

# **Estudio de la viabilidad de la tecnología de impresión 3D aplicada al sector de la construcción naval**

**Trabajo Final de Grado**



Facultad de Náutica de Barcelona  
Universidad Politécnica de Cataluña

Trabajo realizado por:  
**Alejandro Cortés Carmona**

Dirigido por:  
**Jordi Torralbo Gavilan**

Grado en Ingeniería en Sistemas i Tecnología Naval

Barcelona, 9, Julio, de 2019

Departamento de Ciencia e Ingeniería Naval

## Agradecimientos

Me gustaría dedicar un especial agradecimiento a mi familia por el apoyo y la comprensión mostrada a lo largo de la elaboración de este trabajo.



## Resumen

En este trabajo, se estudiará de qué manera ha afectado la fabricación aditiva al sector naval. Para ello, se realizará un análisis en base a los tipos de sistemas que componen esta tecnología, para determinar cuáles son más adecuados para este sector.

Una vez analizado los tipos de sistema, se mostrará cómo estos han sido adaptados a la construcción de grandes estructuras y de qué manera los materiales disponibles para la fabricación aditiva son capaces de sustituir o igualar a los ya utilizados en sector naval.

Además, para evidenciar lo competente que puede resultar la fabricación aditiva al sector naval, se analizarán diferentes casos que han resultado exitosos y que remarcan los grandes beneficios que trae o traerá esta tecnología a este sector. Previamente a esto se hará una breve introducción de cómo la fabricación aditiva ha afectado a algunos de los sectores más importantes que ya la integran como método de producción, para de esta manera, cuando se introduzca el sector naval, se pueda tener una idea de cómo ha avanzado esta tecnología en comparación con otros sectores.

Por último, se incluirá la normativa vigente que supervisa estos procesos para poder ser aplicados a este sector y se realizará una valoración de los pros y contras que presenta a día de hoy esta tecnología y de cómo esta puede llegar a mejorar en un futuro la industria naval.

## Abstract

In this work, it will be studied how the additive manufacturing has affected the naval sector. For this, an analysis will be carried out based on the types of systems that make up the technology, to determine which are more suitable for this sector.

Once the types of technology have been analyzed, it will be shown how this has been adapted to the construction of large structures and in what way the materials available for additive manufacturing are able to replace or match those already used in the naval sector.

In addition, to demonstrate how competent additive manufacturing can be to the naval sector, we will analyze different cases that have been successful and that highlight the great benefits that this technology brings or will bring to this sector. Prior to this, a brief introduction will be made of how additive manufacturing has affected some of the most important sectors that already integrate it as a production method, in this way, when the naval sector is introduced, you can have an idea of how This technology has advanced compared to other sectors.

Finally, the current regulations that supervise these processes will be included in order to be applied to this sector and an assessment of the pros and cons presented by this technology and how it can be improved in the future by the naval industry will be made.

# Tabla de contenido

|  |               |
|--|---------------|
| <b>Agradecimientos .....</b>                               | <b>- 2 -</b>  |
| <b>Resumen .....</b>                                       | <b>- 4 -</b>  |
| <b>Abstract .....</b>                                      | <b>- 5 -</b>  |
| <b>Tabla de contenido .....</b>                            | <b>- 6 -</b>  |
| <b>Lista de Figuras.....</b>                               | <b>- 8 -</b>  |
| <b>Lista de Tablas.....</b>                                | <b>- 11 -</b> |
| <b>Capítulo 1 : Introducción .....</b>                     | <b>- 13 -</b> |
| <b>Capítulo 2 : Estudio de la fabricación aditiva.....</b> | <b>- 15 -</b> |
| 2.1    Apunte histórico de la impresión 3D.....            | - 15 -        |
| 2.2    Tipos de impresoras 3D .....                        | - 16 -        |
| 2.2.1    Impresión por polimerización VAT .....            | - 18 -        |
| 2.2.2    Impresión por extrusión de materiales:.....       | - 22 -        |
| 2.2.3    Inyección de material.....                        | - 23 -        |
| 2.2.4    Impresión por aglutinante (BJ) .....              | - 26 -        |
| 2.2.5    Impresión por fusión de lecho de polvo .....      | - 27 -        |
| 2.2.6    Deposición directa de energía .....               | - 32 -        |
| 2.2.7    Impresión por laminación de piezas .....          | - 35 -        |
| 2.3    Tabla comparativa de impresoras 3D .....            | - 36 -        |
| <b>Capítulo 3 : Aplicación actual por sector .....</b>     | <b>- 40 -</b> |
| 3.1    Deportes .....                                      | - 40 -        |
| 3.2    Medicina .....                                      | - 41 -        |
| 3.3    Transporte.....                                     | - 42 -        |
| 3.4    Arquitectura .....                                  | - 43 -        |

|   |               |
|---|---------------|
| <b>Capítulo 4 : Aplicación en el sector naval .....</b>                                     | <b>- 45 -</b> |
| 4.1    Impresión aditiva en embarcaciones .....   | - 46 -        |
| 4.2    Materiales para la fabricación aditiva.....  | - 53 -        |
| 4.3    Impresión aditiva de gran formato .....  | - 56 -        |
| 4.4    Ventajas y desventajas de la impresión aditiva .....                                 | - 67 -        |
| <b>Capítulo 5 : Marco de calificación y certificación para la fabricación aditiva .....</b> | <b>- 69 -</b> |
| 5.1    Comparación entre los procesos de calificación y certificación.....                  | - 69 -        |
| 5.2    Vía de certificación de DNV GL para productos de fabricación aditiva .....           | - 69 -        |
| <b>Capítulo 6 :Futuro de la fabricación aditiva en el sector naval .....</b>                | <b>- 76 -</b> |
| <b>Conclusión.....</b>  | <b>- 78 -</b> |
| <b>Bibliografía.....</b>  | <b>- 80 -</b> |

# Lista de Figuras

## Capítulo 2 : Estudio de la fabricación aditiva

|   |             |
|---|-------------|
| <i>Figura 2-1 : esquema de los principales sistemas de impresión 3D.....</i>                | <i>17 -</i> |
| <i>Figura 2-2: esquema resumen de la impresión por aglutinante.....</i>                     | <i>18 -</i> |
| <i>Figura 2-3: funcionamiento de una impresora (SLA) .....</i>                              | <i>18 -</i> |
| <i>Figura 2-4: funcionamiento de una impresora (DLP).....</i>                               | <i>19 -</i> |
| <i>Figura 2-5: funcionamiento de una impresora (CLIP) .....</i>                             | <i>21 -</i> |
| <i>Figura 2-6: funcionamiento de una impresora (FDM) .....</i>                              | <i>22 -</i> |
| <i>Figura 2-7: esquema resumen de la impresión por inyección de material.....</i>           | <i>23 -</i> |
| <i>Figura 2-8: funcionamiento de una impresora Polyjet.....</i>                             | <i>24 -</i> |
| <i>Figura 2-9: funcionamiento de una impresora (NPJ) .....</i>                              | <i>25 -</i> |
| <i>Figura 2-10: funcionamiento de una impresora (BJ) .....</i>                              | <i>26 -</i> |
| <i>Figura 2-11: esquema resumen de la impresión por aglutinante.....</i>                    | <i>27 -</i> |
| <i>Figura 2-12: funcionamiento de una impresora (EBM).....</i>                              | <i>28 -</i> |
| <i>Figura 2-13: funcionamiento de una impresora (SLM) .....</i>                             | <i>29 -</i> |
| <i>Figura 2-14: funcionamiento de una impresora (SLS).....</i>                              | <i>30 -</i> |
| <i>Figura 2-15: funcionamiento de una impresora (MJF).....</i>                              | <i>31 -</i> |
| <i>Figura 2-16: esquema resumen de la impresión por deposición directa de energía .....</i> | <i>32 -</i> |
| <i>Figura 2-17: funcionamiento de una impresora (LENS) .....</i>                            | <i>33 -</i> |
| <i>Figura 2-18: funcionamiento de una impresora (EBAM) .....</i>                            | <i>34 -</i> |
| <i>Figura 2-19: funcionamiento de una impresora (LOM) .....</i>                             | <i>35 -</i> |
| <i>Figura 2-20: ejemplo de soportes para impresión aditiva .....</i>                        | <i>36 -</i> |
| <i>Figura 2-21: ejemplo de volumen de fabricación .....</i>                                 | <i>37 -</i> |
| <i>Figura 2-22: ejemplo de cómo afecta a la pieza la altura de capa .....</i>               | <i>37 -</i> |
| <i>Figura 2-23: ejemplo de cómo varia la velocidad con el grosor de capa .....</i>          | <i>38 -</i> |

## Capítulo 3 : Aplicación actual por sector

|   |             |
|---|-------------|
| <i>Figura 3-1: ejemplo de calzado impresos por Nike.....</i>        | <i>41 -</i> |
| <i>Figura 3-2: ejemplo de prótesis infantil de bajo coste .....</i> | <i>42 -</i> |
| <i>Figura 3-3: ejemplo de neumático impreso por Michelin .....</i>  | <i>43 -</i> |



|  |               |
|--|---------------|
| <i>Figura 3-4: ejemplo de casa impresa en China.....</i> | <i>- 44 -</i> |
|--|---------------|

## **Capítulo 4 : Aplicación en el sector naval**

|  |               |
|--|---------------|
| <i>Figura 4-1: esquema del contenido del capítulo 4 aplicación en el sector naval .....</i>  | <i>- 45 -</i> |
| <i>Figura 4-2: esquema de Impresión aditiva en embarcaciones .....</i>                       | <i>- 46 -</i> |
| <i>Figura 4-3: proceso de impresión de una de las secciones del molde del casco.....</i>     | <i>- 47 -</i> |
| <i>Figura 4-4: mecanizado de una de las secciones del molde del casco .....</i>              | <i>- 48 -</i> |
| <i>Figura 4-5: procesos de ensamblaje de las secciones del molde del casco .....</i>         | <i>- 48 -</i> |
| <i>Figura 4-6: proceso de infusión del casco y partes acabadas del casco .....</i>           | <i>- 49 -</i> |
| <i>Figura 4-7: diseño del mini 650 de Livrea Yacht .....</i>                                 | <i>- 49 -</i> |
| <i>Figura 4-8: procesos de fabricación del casco del mini 650 con el sistema OCORE.....</i>  | <i>- 50 -</i> |
| <i>Figura 4-9: perfil frontal y lateral del timón del mini 650 de OCORE.....</i>             | <i>- 50 -</i> |
| <i>Figura 4-10: procesos de fabricación de la hélice WAAMPeller con el sistema WAAM.....</i> | <i>- 52 -</i> |
| <i>Figura 4-11: inauguración e instalación de la hélice .....</i>                            | <i>- 52 -</i> |
| <i>Figura 4-12: parte a escanear y modelo en formato CAD .....</i>                           | <i>- 53 -</i> |
| <i>Figura 4-13: esquema de materiales para la aditiva en embarcaciones .....</i>             | <i>- 54 -</i> |
| <i>Figura 4-14: sección del casco de Livrea Yatch.....</i>                                   | <i>- 54 -</i> |
| <i>Figura 4-15: esquema de las impresoras de fabricación aditiva de gran formato .....</i>   | <i>- 57 -</i> |
| <i>Figura 4-16: fotografía del sistema de impresión BAAM .....</i>                           | <i>- 58 -</i> |
| <i>Figura 4-17: zona de trabajo de la impresora BAAM.....</i>                                | <i>- 58 -</i> |
| <i>Figura 4-18: fotografía del sistema de impresión LSAM .....</i>                           | <i>- 59 -</i> |
| <i>Figura 4-19: rueda de compresión y sistemas de extrusión de plástico.....</i>             | <i>- 60 -</i> |
| <i>Figura 4-20: panel de madera contrachapada con gránulos de ABS.....</i>                   | <i>- 60 -</i> |
| <i>Figura 4-21: fotografía del sistema de impresión CFAM.....</i>                            | <i>- 61 -</i> |
| <i>Figura 4-22: zona de trabajo de la impresora y sistema de extrusión .....</i>             | <i>- 62 -</i> |
| <i>Figura 4-23: fotografía del sistema de impresión WHAM .....</i>                           | <i>- 62 -</i> |
| <i>Figura 4-24: fotografía del sistema de impresión WAAM.....</i>                            | <i>- 63 -</i> |
| <i>Figura 4-25: proceso de impresión del sistema de impresión WAAM .....</i>                 | <i>- 64 -</i> |
| <i>Figura 4-26: fotografía del sistema de sistema de construcción LASIMM .....</i>           | <i>- 64 -</i> |
| <i>Figura 4-27: fotografía del sistema de impresión LAAM .....</i>                           | <i>- 65 -</i> |
| <i>Figura 4-28: proceso de impresión del sistema de impresión LAAM .....</i>                 | <i>- 65 -</i> |
| <i>Figura 4-29: fotografía del sistema de impresión Titomic Kinetic Fusion .....</i>         | <i>- 66 -</i> |

*Figura 4-30: plataforma y sistema de pulverización de Titomic Kinetic Fusion* .....- 66 -

*Figura 4-31: demostración de la anisotropía en la fabricación FDM*.....- 68 -

## **Capítulo 5 : Marco de calificación y certificación para la fabricación aditiva**

*Figura 5-1: esquema de actividades durante la calificación del procedimiento de fabricación*.....- 72 -

# Lista de Tablas

## Capítulo 2 : Estudio de la fabricación aditiva

|  |             |
|--|-------------|
| <i>Tabla 2.1: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (SLA).....</i>                | <i>19 -</i> |
| <i>Tabla 2.2: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (DLP) .....</i>               | <i>20 -</i> |
| <i>Tabla 2.3: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (CLIP).....</i>               | <i>21 -</i> |
| <i>Tabla 2.4: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (FDM).....</i>                | <i>23 -</i> |
| <i>Tabla 2.5: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (MJ).....</i>                 | <i>24 -</i> |
| <i>Tabla 2.6: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (NPJ) .....</i>               | <i>26 -</i> |
| <i>Tabla 2.7: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (NPJ) .....</i>               | <i>27 -</i> |
| <i>Tabla 2.8: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (EBM).....</i>                | <i>28 -</i> |
| <i>Tabla 2.9: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (SLM) .....</i>               | <i>29 -</i> |
| <i>Tabla 2.10: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (SLS).....</i>               | <i>31 -</i> |
| <i>Tabla 2.11: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (MJF).....</i>               | <i>32 -</i> |
| <i>Tabla 2.12: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (LENS) .....</i>             | <i>33 -</i> |
| <i>Tabla 2.13: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (LENS) .....</i>             | <i>34 -</i> |
| <i>Tabla 2.14: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (LENS) .....</i>             | <i>35 -</i> |
| <i>Tabla 2.15: parámetros para evaluar el análisis final de los distintos sistemas de impresión.....</i> | <i>38 -</i> |
| <i>Tabla 2.16: Análisis final de los distintos sistemas de impresión .....</i>                           | <i>39 -</i> |

## Capítulo 5 : Marco de calificación y certificación para la fabricación aditiva

|  |             |
|--|-------------|
| <i>Tabla 5.1: Características típicas de los procesos de calificación y certificación.....</i>       | <i>69 -</i> |
| <i>Tabla 5.2: Requisitos durante los regímenes de calificación, aprobación y certificación .....</i> | <i>70 -</i> |
| <i>Tabla 5.3: Etapas en el proceso de calificación .....</i>   | <i>71 -</i> |
| <i>Tabla 5.4: Áreas típicas para la aprobación DNV GL .....</i>                                      | <i>75 -</i> |



## Capítulo 1 : Introducción

La comúnmente llamada impresión 3D o fabricación aditiva en términos de uso más profesional, trata de maquinaria que gracias a su sistema, permite crear objetos mediante la sucesiva impresión de capas para una gran variedad de ámbitos, tanto a nivel industrial como personal.

Son muchos los que en la actualidad trabajan con este tipo de sistema y ya se han adaptado completamente a la tecnología y digitalización, motivo que está generando que poco a poco estos sean requisitos imprescindibles para la supervivencia de las empresas, y a su vez se cambie la forma en que se entiende la producción. Esto es gracias a los muchos beneficios que aporta este cambio a las empresas. Es por ello que en el sector naval se está empezando a implementar este tipo de tecnología tal y como está sucediendo en otros sectores. Este sistema ya ha demostrado que es eficiente y rentable, por lo tanto, es importante considerarlo como un posible sustituto a los métodos ya existentes, para así aportar un soplo de aire fresco a la industria naval gracias a su gran rapidez y flexibilidad a la hora de fabricar piezas.

Al considerando la velocidad en la que avanza la tecnología, es muy probable que en un futuro no muy lejano este tipo de impresión rompa la limitación actual y permita la creación de piezas de tamaños considerables. Este cambio supondría un aumento en la producción y aseguraría un mayor beneficio a fabricantes y compradores gracias al bajo coste de producción que implica el uso de esta tecnología. Además, aportara la capacidad de simplificar los procesos de ensamblaje actuales mediante la impresión de piezas únicas o en menor cantidad que las compuestas en los procesos tradicionales.

Actualmente, son pocas las empresas que han decidido prescindir de los métodos convencionales e implementar este tipo de tecnología. Es por ello que se carece de un modelo capaz de cubrir las necesidades constructivas requeridas para algunas de las estructuras que se dan en este sector. La solución a esto supone una gran inversión de capital, motivo por el cual, en este trabajo se estudiará si merece la pena realizar esta inversión para asegurar un futuro más próspero en el sector naval.

En este trabajo, se tomará como objetivo principal los siguientes temas:

En primer lugar, para conocer el estado de desarrollo en el que se encuentra esta tecnología dentro del sector naval y así poder tener una idea más clara de cuáles son las posibilidades y limitaciones que presenta este método actualmente, se investigaran los antecedentes de las empresas que ya han implementado la fabricación aditiva a sus procesos de fabricación. Esta parte del trabajo ayudara a conocer las motivaciones que les han impulsado a desarrollar dichos proyectos, a la vez que se podrá recoger la experiencia obtenida de estas empresas en los procesos de fabricación.

En segundo lugar, se analizarán los tipos de impresoras y materiales capaces de cubrir las necesidades técnicas de los procesos que se desarrollan en el sector naval, permitiendo así conocer el grado de compatibilidad que presenta esta tecnología en el sector naval.

Con todo esto mencionado, se realizará una evaluación de las ventajas y desventajas que supone la incorporación de este sistema. Esta evaluación estará basada en la información recogida anteriormente, la cual se contrastará o complementará en caso de ser necesario para aportar mayor validez al trabajo.

Posteriormente, se estudiará, a que normas está sujeta la fabricación aditiva dentro del sector naval y de qué maneras estas afectan a las empresas que emplean esta tecnología en sus procesos de fabricación. Para finalizar el trabajo, se realizará una reflexión que muestre la visión de futuro en este sector que presenta esta tecnología según la información recogida a lo largo del trabajo y mediante la opinión desarrollada en este.

Hay que tener en consideración que obtener esta información no resulta fácil en algunos casos, tal y como se ha mencionado, no es muy habitual encontrar empresas en el sector especializadas en este tipo de sistema, y que a su vez puede que esta restrinja su información al público. es por ello que las principales fuentes que se consultará a lo largo de este trabajo, en su gran mayoría serán artículos especializados o documentos técnicos aportados por las empresas implicadas en estos proyectos.

Al final de este trabajo se pretende demostrar mediante un estudio en profundidad del estado actual de la fabricación aditiva en el sector naval, si esta tecnología revolucionaria será capaz de abrirse paso en el sector naval como una de las principales responsables de la fabricación de embarcaciones en el sector naval.

## Capítulo 2 : Estudio de la fabricación aditiva

### 2.1 Apunte histórico de la impresión 3D

A continuación, se hará una breve introducción de los primeros indicios que se conocen de la fabricación aditiva y se mostrara como surgieron algunos de los empresarios y empresas más relevantes.

Si bien se cree que la impresión 3D es un sistema moderno y actual, para conocer uno de los primeros intentos de crear este tipo de sistema, nos tendríamos que remontar a tiempo más atrás, concretamente a finales de los años 1960, en los cuales el instituto Battelle Memorial de Ohio, realizo un experimento que consistía en aplicar dos rayos láseres que se cruzan entre sí a distintas longitudes de onda sobre una resina con el objetivo de lograr su polimerización.<sup>1</sup>

Posteriormente, ya en el año 1967, Wyn K. Swainson de Dinamarca, solicitó una patente con la que esperaba poder comercializar y desarrollar una tecnología similar a la anteriormente expuesta. Años después, concretamente a principios de los años 1970 Swainson, fundó la empresa Formigraphic Engine Corp. en California, y aplicando la patente en el uso del doble láser, creó el primer proyecto comercial de láser el cual llamó mecanizado fotoquímico. Ya en 1974, la empresa demostró que se podían crear objetos 3D con el uso de sistemas rudimentarios. Tras años en activo, este proyecto nunca llegó a ser un proyecto comercial viable.

A finales de los años 1970, Dynell Electronics Corp., adquirió una serie de patente sobre la fotografía sólida. Este método consistía en el corte de secciones transversales mediante el control de una computadora usando una fresadora ó laser para formar objetos 3D.

Ya a finales de 1980, el Doctor japonés Hideo Kodama, trabajador del instituto de investigación industrial municipal de Nagoya, solicitó una patente para un sistema el cual utilizaba un rayo ultravioleta a través de una lámpara de mercurio, resina fotosensible y una máscara para controlar la exposición de la fuente de luz ultravioleta. El proceso consistía en solidificar consecutivamente finas capas de resina gracias a la luz ultravioleta hasta formar el objeto deseado. Tras un año de patente solicitada, por culpa de problemas financieros, esta expiró perdiendo así los derechos del invento.

En julio de 1984, los franceses Jean-Claude Andre, Oliver de Witte y Alain le Méhauté, solicitaron la patente por el proceso de estereolitografía (SLA). La patente fue solicitada tres semanas antes que el americano Chuck Hall, el cual posteriormente se consideró como el inventor de esta tecnología. La pérdida de los derechos del equipo francés fue debida al abandono de la patente por parte de los patrocinadores (French General Electric Company y CILAS) los cuales alegaban que se trataba de un proyecto con poco potencial.

Como se ha explicado anteriormente, 1983 al americano Chuck Hall, también se le ocurrió la idea de patentar el proceso de la estereolitografía. Tras la pérdida del grupo francés de esta, se le otorgó la patente el 11 de marzo de 1986. Uno de los aspectos clave que hicieron que Chuck Hall pudiera sacarle

---

<sup>1</sup>DuPont, inventó en los años 1950 la resina fotopolímera que se utilizó en el proceso, la cual cambia sus propiedades al polimerizarse tras ser expuesto a la luz (cambia de un estado líquido a un estado sólido).

partido a esta tecnología a diferencia de sus predecesores, fue los materiales y el software que desarrollo, los cuales, años anteriores no existían. Esto demuestra que para impulsar esta tecnología no es suficiente con solo crear una impresora. Chuck Hall, definió la estereolitografía como una forma de fabricación de objetos en tres dimensiones mediante la sucesiva impresión de miles de capas delgadas solidas de forma apilada tras someter el fotopolímero líquido que las componen a luz ultravioleta mediante un haz de luz controlado por una computadora. Poco después de conseguir la patente, Chuck Hall fundó la empresa 3D Systems en Valencia, California, lanzando su primer modelo comercial en 1988. Además, creó todo tipo de patentes como por ejemplo el formato de archivo STL y tipos de materiales adaptados a esta tecnología.

Carl Deckard estudiante de la Universidad de Texas y Joe Beaman profesor de la misma, desarrollaron el sistema de sintetización selectiva por láser (SLS) bajo el patrocinio de DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) que consiste en dirigir un láser controlado por una computadora sobre material en polvo para producir una masa sintetizada. Posteriormente solicitaron la patente del sistema en el año 1987 la cual fue expedida en 1979. Al mismo tiempo fundaron la empresa Desk Top Manufacturing Corp. la cual se dedicaría a construir máquinas con dicha tecnología. El año 2001, la empresa DTM fue adquirida por 3D Systems por un valor de 45 millones de dólares.

En 1989 el ingeniero mecánico llamado Steven Scott Crump, tras pensar en cómo construirle una rana de juguete a su hija de 2 años, se le ocurrió un método basado en la fabricación aditiva. Este consistía en mezclar cera de vela con polietileno en el interior de una pistola de pegamento caliente, para de esta manera crear un objeto tridimensional. Posteriormente se trasladó al garaje de su casa motivado por su esposa Lisa Crump y comenzó a trabajar en desarrollar esta idea para posteriormente llegar a comercializar dicha tecnología. A una de las conclusiones a las que llegó, es que si a esta pistola se le podía unir un robot de coordenadas cartesianas, podría automatizar este sistema. De esta manera se ideó así en su cabeza el primer método de impresora de modelado de deposición fundida (FDM). Poco después, patentó la idea y fundó la empresa Stratasys inc. Junto a su esposa poco después de crear en 1992 la primera impresora FDM operativa.

## 2.2 Tipos de impresoras 3D

Actualmente existen muchos tipos de impresoras 3D, cada una de ellas con un sistema particular que lo hace diferente y le aporta al usuario unas características adecuadas al tipo de uso, economía, acabado, material etc. que requiere.

Si bien este trabajo está destinado a introducir la fabricación aditiva al sector naval, hay que tener en cuenta que cuando hablamos de una embarcación, también debemos incluir todos los elementos que la componen, por tanto, se podría decir que desde el elemento más básico al más complejo (salvo excepciones), serán posible fabricarlo mediante estos sistemas expuestos.

Tal y como se muestra en la figura 2.1, estos son los sistemas de fabricación aditiva más utilizados en la fabricación de productos. El objetivo de este apartado, es mostrar el funcionamiento paso a paso que siguen los diferentes sistemas en su proceso de impresión, además de también analizar los diferentes materiales (principalmente de ingeniería) que se emplean en estos procesos, mostrando así la aplicación, composición y algunos ejemplos.



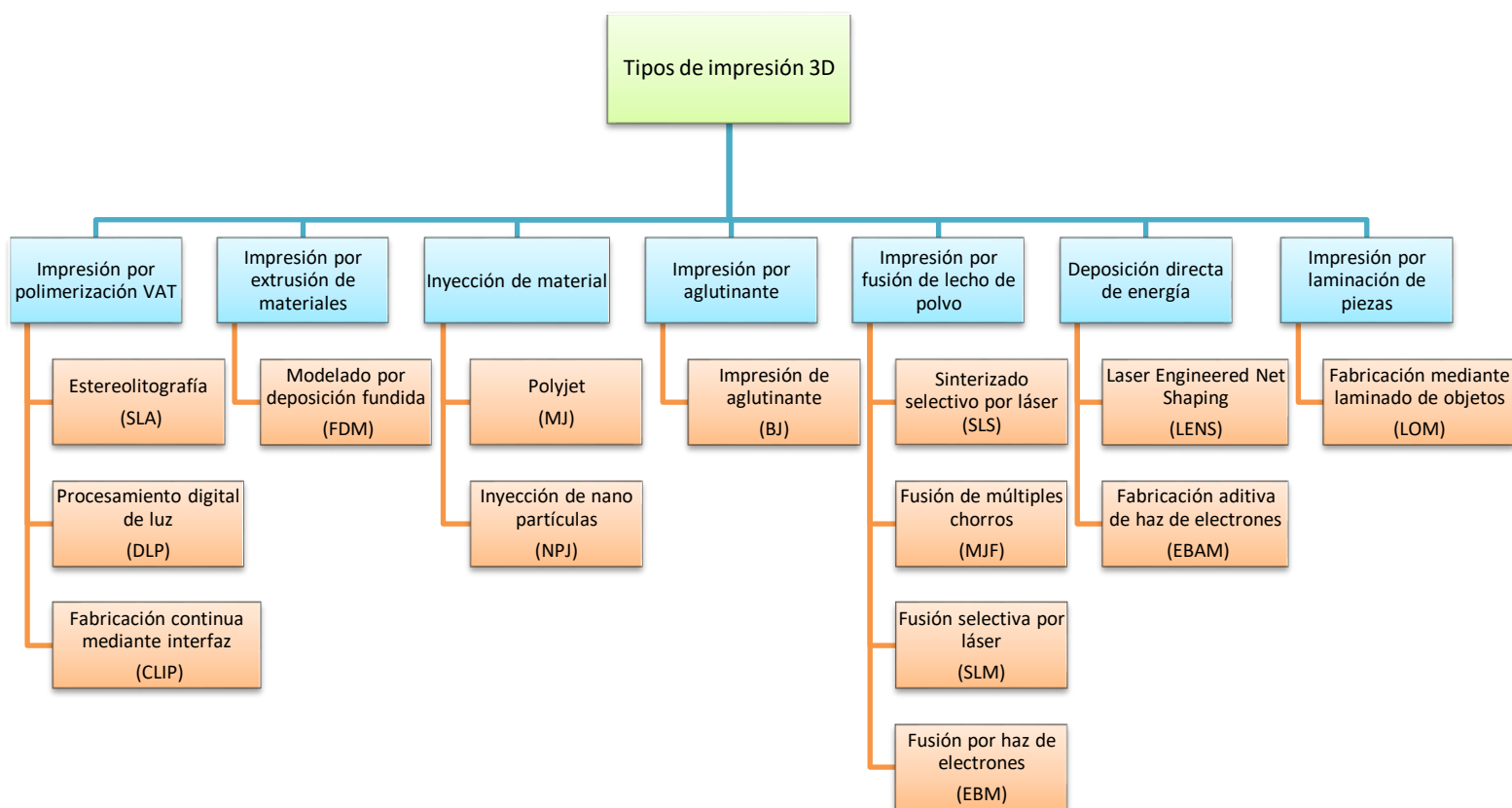


Figura 2-1 : esquema de los principales sistemas de impresión 3D – Fuente: propia

Los sistemas que se presentarán en este apartado, tienen un punto en común, en todos se requiere introducir el archivo con el formato SLT de la pieza modelada en una de las diversas aplicaciones CAD en el software de la impresora para que esta trabaje en base a este diseño.

Este diseño estará dividido en muchas capas desde la base a hasta la parte superior, las cuales conformarán la pieza final. En algunos casos el proceso de impresión requerirá que la pieza que se desea fabricar lleve soportes, este sería el caso de que se esté fabricando una pieza para la cual, en una de sus formas, la máquina tenga que trabajar con geometrías complicadas, voladizos o cavidades.

Para crear estructuras de soportes, existen programas que las generen automáticamente. Una vez la pieza esté finalizada, estas deben poder separarse de la pieza con facilidad. Algunos fabricantes cuentan con materiales específicos solo para soportes que facilitan esta tarea como por ejemplo materiales solubles.

### 2.2.1 Impresión por polimerización VAT

Esta técnica de impresión, presenta tres variantes diferentes que se mostraran a continuación en la figura 2.2.

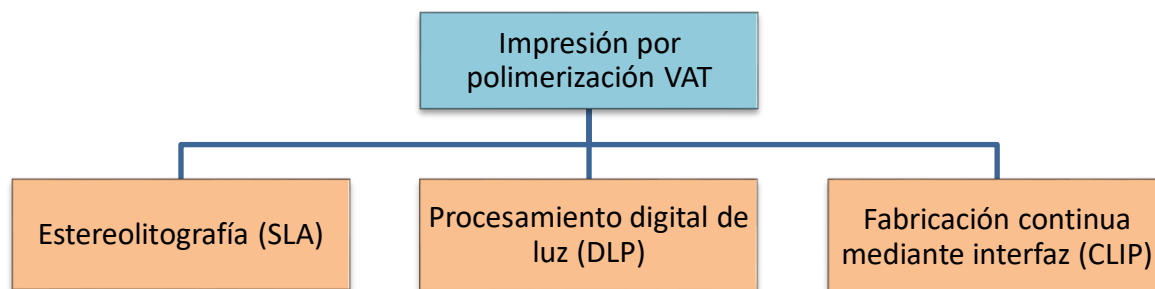


Figura 2-2: esquema resumen de la impresión por aglutinante – Fuente: propia

#### • Estereolitografía (SLA)

Las bases del funcionamiento de la impresión SLA se muestran en la figura 2.3.

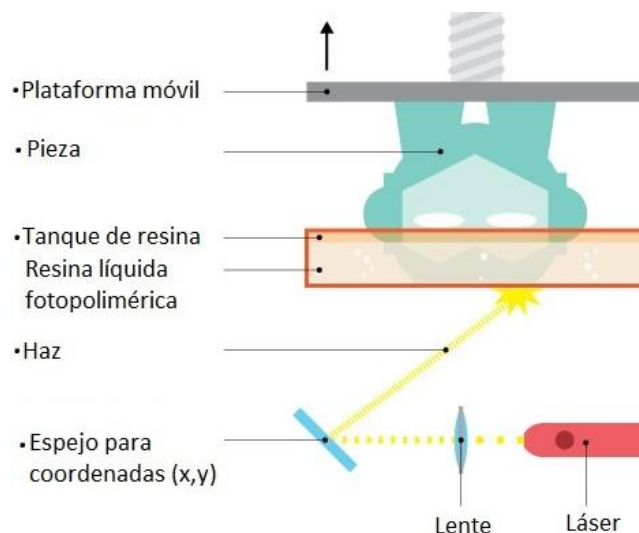


Figura 2-3: funcionamiento de una impresora (SLA) – Fuente: [3dhubs.com](https://3dhubs.com)

A continuación, se detallan los pasos a seguir para realizar una impresión (SLA):

1. La plataforma de impresión móvil se introduce en el tanque de resina líquida fotopolimérica<sup>2</sup> manteniendo una distancia respecto al fondo del tanque correspondiente al espesor de la primera capa a crear.
2. Un rayo láser UV es enfocado mediante un sistema de lente y reflejado por un espejo según las coordenadas introducidas, golpea el fondo transparente a la radiación UV del tanque de resina.
3. Después de finalizada la primera capa, la plataforma asciende un nivel, concretamente el del espesor de la capa creada anteriormente permitiendo que el fondo de tanque vuelva a llenarse de polímero líquido.

<sup>2</sup>Resina líquida fotopolimérica: tipo de resina que al entrar en contacto con una fuente de luz, altera sus propiedades a un estado sólido.

4. Una vez completando el primer ciclo, el proceso se vuelve a repetir. Hay tantos ciclos como capas requiere la pieza para completar la totalidad de la pieza.
5. Una vez finalizada la pieza, esta es sometida a una limpieza para eliminar el exceso de resina y curada en un horno de luz ultravioleta.

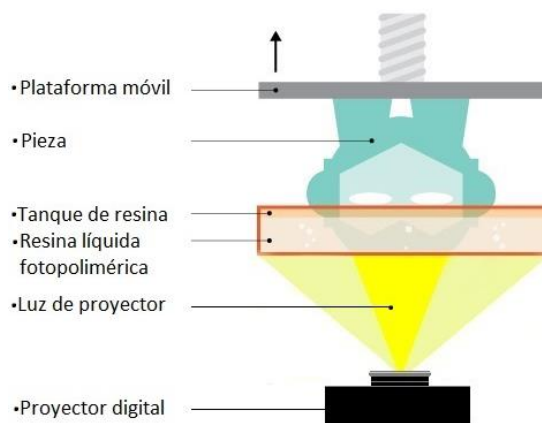
Los materiales utilizados para esta impresión son los que se muestran en la Tabla 2.1.

*Tabla 2.1: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (SLA) – fuente: [formlabs.com](http://formlabs.com)*

| Nombre    | Descripción / Aplicación   | Composición  |
|-----------|--|--|
| Tough     | Es utilizado para prototipos y juntas a presión.   | Mezcla de ésteres de ácido metacrílico y acrílico, fotoiniciadores.                                |
| Grey Pro  | Es utilizado para la creación de prototipos, especialmente diseñado para la creación de piezas funcionales y para pruebas rigurosas. | Mezcla de ésteres de ácido metacrílico, fotoiniciadores, pigmento patentado y paquete de aditivos. |
| Durable   | Es utilizado para hacer prototipos de piezas que requieren deformación y un acabado suave y pulido.<br><b>Ejemplo:</b> engranajes    | Mezcla de ésteres de ácido metacrílico, fotoiniciadores, pigmento patentado y paquete de aditivos. |
| Flexible  | Es utilizado para crea piezas que pueden doblarse y comprimirse.   | Mezcla de ésteres de ácido metacrílico, fotoiniciadores, pigmento patentado y paquete de aditivos. |
| High Temp | Es utilizado para aplicaciones estáticas que experimentarán temperaturas más altas.<br><b>Ejemplo:</b> boquilla de soplete           | Mezcla de ésteres de ácido metacrílico y acrílico, fotoiniciadores.                                |
| Rigid     | Es utilizado para imprimir con precisión detalles finos y duros.   | Mezcla de ésteres de ácido metacrílico, fotoiniciadores, pigmento patentado y paquete de aditivos. |

#### • Procesamiento digital de luz (DLP)

Las bases del funcionamiento de la impresión DLP se muestran en la figura 2.4.






*Figura 2-4: funcionamiento de una impresora (DLP) – Fuente: [3dhubs.com](http://3dhubs.com)*

A continuación, se detallan los pasos a seguir para realizar una impresión (DLP):

1. Se introduce la plataforma móvil de impresión en el tanque de resina líquida fotopolimérica. Al igual que en el sistema SLA, la plataforma debe mantener una distancia respecto al fondo del tanque equivalente al espesor de la primera capa.
2. Un proyector digital, emite una luz sobre el fondo transparente a la luz del tanque cubriendo la superficie de la primera capa según las coordenadas introducidas creando una fina capa sólida.<sup>3</sup>
3. Después de finalizada la primera capa, la plataforma asciende un nivel, concretamente el del espesor de la capa creada anteriormente permitiendo que el fondo de tanque vuelva a llenarse de polímero líquido.
4. Una vez completando el primer ciclo, el proceso se vuelve a repetir. Hay tantos ciclos como capas requiere la pieza para completar la totalidad de la pieza.
5. Una vez finalizada la pieza, esta es sometida a una limpieza para eliminar el exceso de resina y curada en un horno de luz ultravioleta.

Los materiales utilizados para esta impresión son los que se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (DLP) – Fuente: [envisiointec.com](http://envisiointec.com)

| Nombre               | Descripción / Aplicación  | Composición   |
|----------------------|---|---|
| E-Poxy Series        | Es utilizado en la industria aeroespacial, automoción, bienes de consumo, educación y fabricación.  | Polyoxypropylenediamine.  |
| E-CE<br>(Cyan Ester) | Es utilizado en la automoción, Bienes de consumo, Educación, Dispositivos médicos y Fabricación.<br><b>Ejemplo:</b> piñones                    | 7,7,9-trimetil-4,13-dioxo-3,14-dioxo-5,12-diaza-hexadecan-1,16-diol dimetacrilato y oligómero de acrilato.  |
| E-RigidForm          | Es utilizado en la industria aeroespacial, automoción, bienes de consumo, educación y fabricación.<br><b>Ejemplo:</b> cadenas                  | Oligómero de acrilato, óxido de fosfina, oligómero de metacrilato y monómero de acrilato.   |
| ABS Hi-Impact        | Es utilizado en la industria aeroespacial, entretenimiento, automotriz, bienes de consumo, educación y fabricación.<br><b>Ejemplo:</b> chasis  | Oligómero acrilado, óxido de difenilo (2,4,6 trimetilbenzofosfina), diacrilato de hexanodiol 1,6, monómero de acrilato, oligómero metacrilado y oligómero acrilado. |

<sup>3</sup>Este sistema, en comparación al láser utilizado en el sistema SLA, el proyector digital del sistema DLP creará píxeles cuadrados, esto afectará en que pese a que la calidad no será mala, tendremos menos resolución.

## • Fabricación continua mediante interfaz (CLIP)

Las bases del funcionamiento de la impresión CLIP se muestran en la figura 2.5.

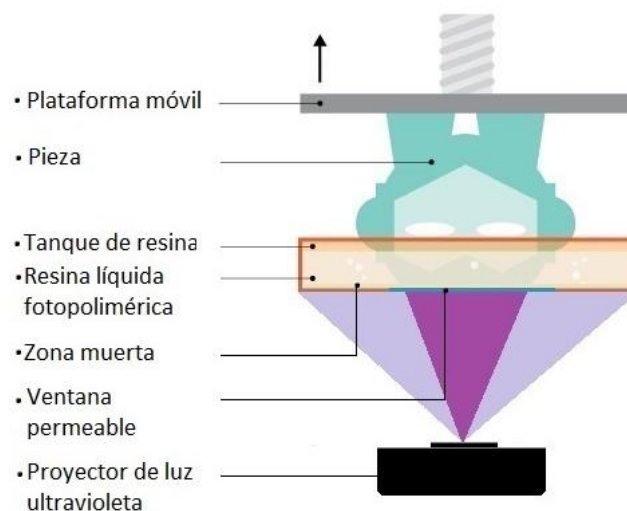


Figura 2-5: funcionamiento de una impresora (CLIP) – Fuente: [3dhubs.com](http://3dhubs.com)

A continuación, se detallan los pasos a seguir para realizar una impresión (CLIP):

1. La plataforma se sitúa en el fondo del tanque de resina por encima de la zona muerta<sup>4</sup> manteniendo una distancia determinada que permita la polimerización de la base de la pieza.
2. Un proyector de luz ultravioleta, emite una luz sobre el fondo transparente del tanque, cubriendo la superficie de lo que será la base de la pieza, según las coordenadas introducidas para la solidificación del fotopolímero.
3. Puesto que este sistema dispone de una zona muerta, constantemente el fondo de tanque dispondrá de fotopolímero líquido, permitiendo que la impresión se realice sin parones y evitando así la necesidad de crear capas.<sup>5</sup>
4. Posteriormente, la plataforma asciende mediante un sistema de calibrado que regulara la velocidad de ascensión y la cantidad de oxígeno mezclado con el fotopolímero líquido hasta la finalización de la pieza.

Los materiales utilizados para esta impresión son los que se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (CLIP) – Fuente: [carbon3d.com](http://carbon3d.com)

| Nombre | Descripción / Aplicación   | Composición   |
|--------|--|---------------|
| EPX    | Es utilizado para productos automotrices, industriales y de consumo. | No disponible |

<sup>4</sup>Zona muerta: el tanque a diferencia de los anteriores modelos, dispone de un fondo transparente permeable al oxígeno, esto permite que se mezcle una pequeña cantidad de oxígeno y el fotopolímero líquido, creando una zona muerta en la parte inferior del tanque donde la resina no puede solidificarse.

<sup>5</sup> El sistema CLIP presenta una velocidad de impresión de 25 a 100 veces más rápido que otras tecnologías tradicionales.

|     |  |               |
|-----|--|---------------|
| FPU | Es utilizado para soportar esfuerzos repetitivos, lo que lo hace ideal para carcasas duras, mecanismos de bisagra y ajustes de fricción.<br><br><b>Ejemplo:</b> chasis | No disponible |
| RPU | Es utilizado para una amplia gama de industrias, incluidos los productos de consumo, automotriz e industrial.<br><br><b>Ejemplo:</b> carcasa                           | No disponible |
| CE  | Es utilizado para aplicaciones que requieren estabilidad térmica a largo plazo, como componentes debajo del capó, conjuntos electrónicos y productos industriales.     | No disponible |
| EPU | Es utilizado para amortiguación, aislamiento de vibraciones, juntas y sellos.  | No disponible |

### 2.2.2 Impresión por extrusión de materiales:

- Modelado por deposición fundida (FDM)

Las bases del funcionamiento de la impresión FDM se muestran en la figura 2.6.

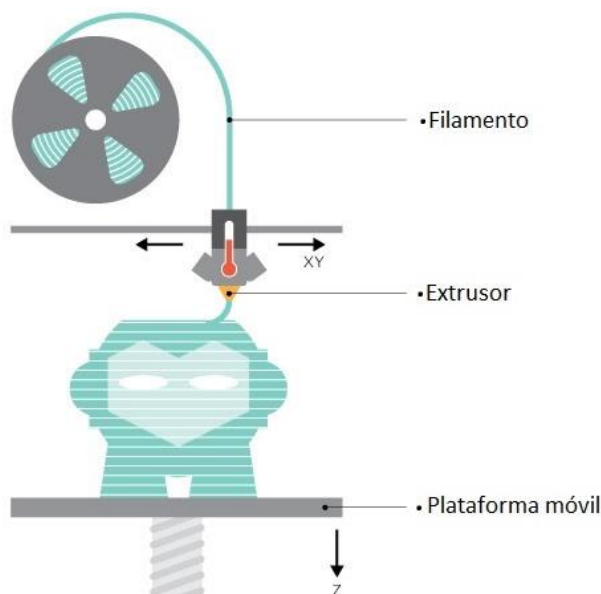


Figura 2-6: funcionamiento de una impresora (FDM) – Fuente: [3dhubs.com](http://3dhubs.com)



A continuación, se detallan los pasos a seguir para realizar una impresión (FDM):

1. Un extrusor, funde el material suministrado por la bobina de filamento y lo deposita sobre la plataforma de impresión móvil mediante una boquilla. El extrusor se moverá según las coordenadas indicadas para cubrir toda la superficie correspondiente a la primera capa de la pieza.
2. Después de finalizada la primera capa, la plataforma de impresión, descenderá un nivel, concretamente el del espesor de la capa creada anteriormente permitiendo así poder superponer una nueva capa.

3. Una vez completando el primer ciclo, el proceso se vuelve a repetir. Hay tantos ciclos como capas requiere la pieza para completar la totalidad de la pieza.
4. Al finalizar el proceso, se debe enfriar la pieza para que el material pueda endurecerse.

Los materiales utilizados para esta impresión son los que se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (FDM) – Fuente: [stratasys.com](http://stratasys.com)

| Nombre       | Descripción / Aplicación   | Composición   |
|--------------|--|---------------|
| PPSF         | Es utilizado para aplicaciones aeroespaciales, automotrices y médicas.<br><br><b>Ejemplo:</b> engranaje    | No disponible |
| PC-ABS       | Es utilizado para la creación de prototipos funcionales y la producción única en los casos en que ni ABS ni PC son suficientes por sí solos.   | No disponible |
| ABSplus-P430 | Es utilizado para la creación de prototipos, piezas únicas y series de producción de bajo volumen de piezas que requieren buenas propiedades mecánicas y bajo costo.<br><br><b>Ejemplo:</b> tapón de deposito  | No disponible |
| Nylon 12     | Es utilizado para aplicaciones con cierres de click, herramientas con elementos de encaje, componentes sujetos a un alto grado de vibración y piezas que requieran el uso de inserciones roscadas.   | No disponible |
| ULTEM 1010   | Es utilizado en prototipos y piezas funcionales de gama alta para aplicaciones de alta resistencia y alta temperatura.   | No disponible |

### 2.2.3 Inyección de material

Esta técnica de impresión, presenta dos variantes diferentes que se mostraran a continuación en la figura 2.7.

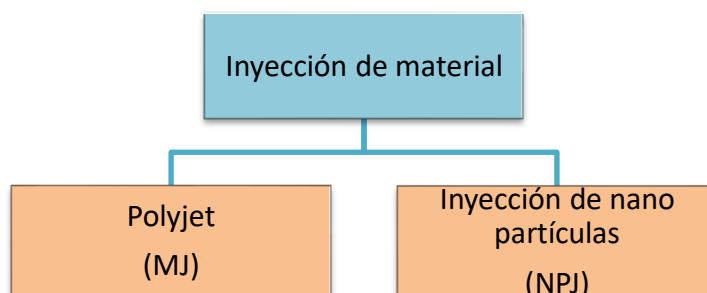


Figura 2-7: esquema resumen de la impresión por inyección de material – Fuente: propia



## • Polyjet (MJ)

Las bases del funcionamiento de la impresión Polyjet se muestran en la figura 2.8.

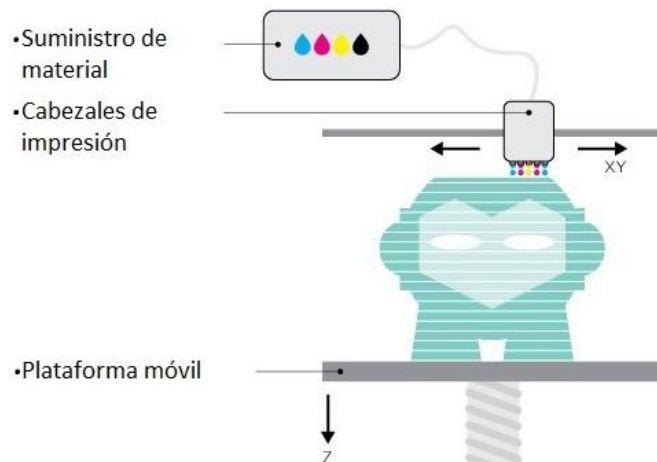


Figura 2-8: funcionamiento de una impresora Polyjet – Fuente: [3dhubs.com](http://3dhubs.com)

A continuación, se detallan los pasos a seguir para realizar una impresión Polyjet:




1. Un cabezal de impresión, deposita sobre la superficie de la plataforma de impresión móvil fotopolímero líquido en forma de gotas y posteriormente las cura con luz ultravioleta. Si la pieza lo requiere, también se añadirá material de soporte de gel extraíble, que luego se eliminará de forma sencilla al finalizar el proceso.
2. El cabezal de impresión se moverá según las coordenadas indicadas para cubrir toda la superficie correspondiente a la primera capa de la pieza.
3. Después de finalizada la primera capa, la plataforma de impresión, descenderá un nivel, concretamente el del espesor de la capa creada anteriormente permitiendo así poder superponer una nueva capa.
4. Una vez completando el primer ciclo, el proceso se vuelve a repetir. Hay tantos ciclos como capas requiere la pieza para completar la totalidad de la pieza.

Los materiales utilizados para esta impresión son los que se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (MJ) – Fuente: [stratasys.com](http://stratasys.com)

| Nombre           | Descripción / Aplicación  | Composición   |
|------------------|---|---------------|
| ABS digital plus | Es utilizado para piezas y prototipos de verificación de diseño y pruebas de rendimiento funcionales que requieren la máxima resistencia al impacto, buen rendimiento mecánico y térmico. | No disponible |
| Durus            | Es utilizado para probar la forma de modelos, el ajuste y la función de los ensamblajes de ajuste a presión, bisagras, carcasas.  | No disponible |
| RGD720           | Es utilizado para pruebas de forma y ajuste, permitiendo a los diseñadores visualizar la colocación e interrelación de las componentes internos.  | No disponible |



|                  |   |               |
|------------------|---|---------------|
| Agilus30         | <p>Es utilizado para el prototipado rápido y la validación del diseño, simula el aspecto, el tacto y la funcionalidad de los productos similares a la goma.</p> <p><b>Ejemplo:</b> junta de culata</p>    | No disponible |
| Alta temperatura | <p>Es utilizado para piezas estáticas o piezas sometidas a pruebas térmicas que deben tener una elevada resistencia térmica como, por ejemplo, accesorios de fontanería y electrodomésticos.</p> <p><b>Ejemplo:</b> rejilla de salida de calefacción</p>  | No disponible |
| VeroClear        | <p>Es utilizado como una alternativa al cristal y es perfecto para el modelado de conceptos y la verificación del diseño de piezas transparentes como gafas, carcasas de luces y dispositivos médicos.</p> <p><b>Ejemplo:</b> plástico transparente</p>    | No disponible |

#### • Inyección de nano partículas (NPJ)

Las bases del funcionamiento de la impresión NPJ se muestran en la figura 2.9.

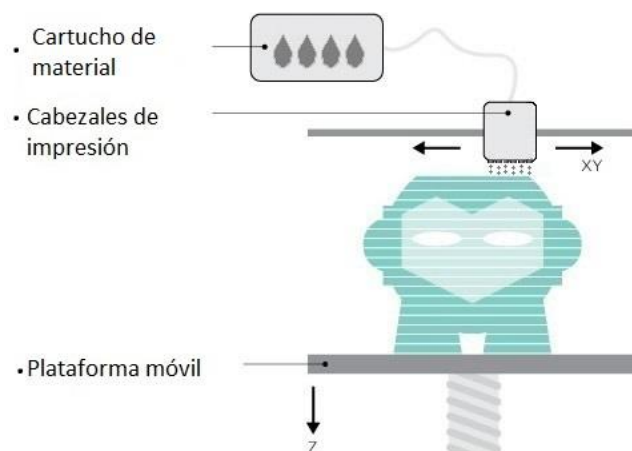


Figura 2-9: funcionamiento de una impresora (NPJ) – Fuente: [3dhubs.com](http://3dhubs.com)

A continuación, se detallan los pasos a seguir para realizar una impresión (NPJ):

1. Un cabezal de impresión con miles de boquillas, dispersa sobre la superficie de la plataforma de impresión móvil partículas metálicas de tamaño nanométrico en una suspensión líquida. Simultáneamente también se añadirá material de soporte soluble, que luego se eliminará de forma sencilla al finalizar el proceso.
2. El cabezal de impresión se moverá según las coordenadas indicadas para cubrir toda la superficie correspondiente a la primera capa de la pieza.

- Después de finalizada la primera capa, la plataforma de impresión, descenderá un nivel, concretamente el del espesor de la capa creada anteriormente permitiendo así poder superponer una nueva capa.
- Una vez completando el primer ciclo, el proceso se vuelve a repetir. Hay tantos ciclos como capas requiere la pieza para completar la totalidad de la pieza.
- Al finalizar el proceso, la pieza se someterá a un proceso de sintetización que durará toda la noche.

Los materiales utilizados para esta impresión son los que se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (NPJ) – Fuente: [xjet3d.com](http://xjet3d.com)

| Nombre                  | Descripción / Aplicación   | Composición   |
|-------------------------|--|---------------|
| XJet metal              | Es utilizado para alto nivel de complejidad geométrica, detalles, acabado de superficie y precisión. | No disponible |
| XJet alumina (ceramica) | Es utilizado para alto nivel de complejidad geométrica, detalles, acabado de superficie y precisión. | No disponible |

#### 2.2.4 Impresión por aglutinante (BJ)

Las bases del funcionamiento de la impresión SLA se muestran en la figura 2.10.

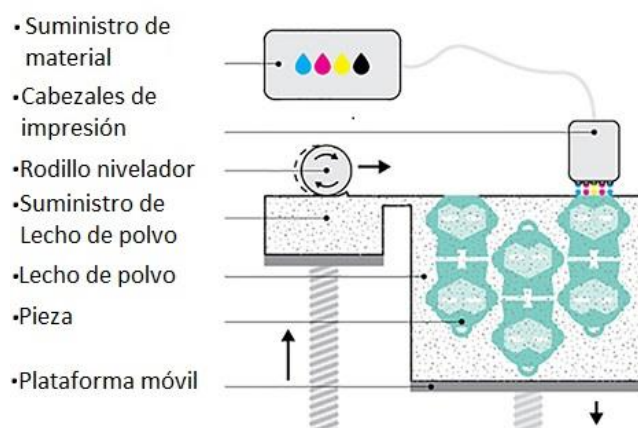


Figura 2-10: funcionamiento de una impresora (BJ) – fuente: [3dhubs.com](http://3dhubs.com)

A continuación, se detallan los pasos a seguir para realizar una impresión (BJ):


- Se dispone de dos cajas unidas, una de suministro de lecho de polvo (llena) y la otra de impresión (vacía). Las dos cajas disponen de plataformas móviles, de las cuales la de suministro se situará en la parte inferior y la de impresión en la parte superior de la caja.
- La plataforma de la caja de suministro asciende y la de la caja de impresión descende, una altura correspondiente al espesor de la primera capa. Posteriormente, un rodillo arrastra el material en polvo de la caja de suministro y lo desplaza a la caja de impresión creando así un lecho de polvo.
- Un cabezal de impresión, pulveriza aglutinante líquido sobre el lecho de polvo permitiendo que las partículas se unan para así crear una fina capa sólida.

El cabezal de impresión se moverá según las coordenadas indicadas para cubrir toda la superficie correspondiente a la primera capa de la pieza.

4. Una vez completando el primer ciclo, el proceso se vuelve a repetir. Hay tantos ciclos como capas requiere la pieza para completar la totalidad de la pieza.

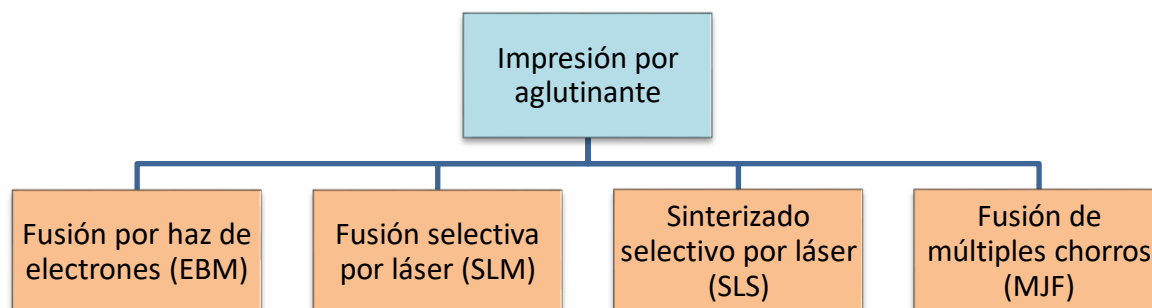
Los materiales utilizados para esta impresión son los que se muestran en la Tabla 2.7.

*Tabla 2.7: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (NPI) – Fuente: [exone.com](http://exone.com)*

| Nombre                           | Descripción / Aplicación  | Composición   |
|----------------------------------|---|---|
| 316L                             | Es utilizado en mercados industriales que van desde la automoción hasta el equipo de procesamiento químico y los instrumentos quirúrgicos.<br><br><b>Ejemplo: piñón</b>  | Hierro, molibdeno, níquel, manganeso, cromo, silicio y carbono.                 |
| Tungsten infiltrated with Bronze | Es utilizado como material de reemplazo del plomo, componentes de protección contra la radiación y colimadores.   | Tungsten y bronce.  |
| 304L                             | Es utilizado en componentes para uso marino, médico, utensilios de cocina, electrodomésticos e intercambiadores de calor.   | Hierro, azufre, níquel, manganeso, cromo, silicio, carbono y fósforo.           |
| 420 Infiltrated with Bronze      | Es utilizado para piezas expuestas a entornos altamente abrasivos, como componentes de bombas y piezas para perforación de pozos y equipos de minería.  | Acero Inoxidable / Bronce, cobre y estaño.                                      |
| 17-4PH                           | Es utilizado para aplicaciones que requieren alta resistencia, nivel moderado de resistencia a la corrosión y soldabilidad.   | Iron, niobium + tantalum, nickel, manganeso, chromium, silicon, carbon y copper |

## 2.2.5 Impresión por fusión de lecho de polvo

Esta técnica de impresión, presenta cuatro variantes diferentes que se mostraran a continuación en la figura 2.11.



*Figura 2-11: esquema resumen de la impresión por aglutinante – Fuente: propia*

## • Fusión por haz de electrones (EBM)

Las bases del funcionamiento de la impresión EBM se muestran en la figura 2.12.

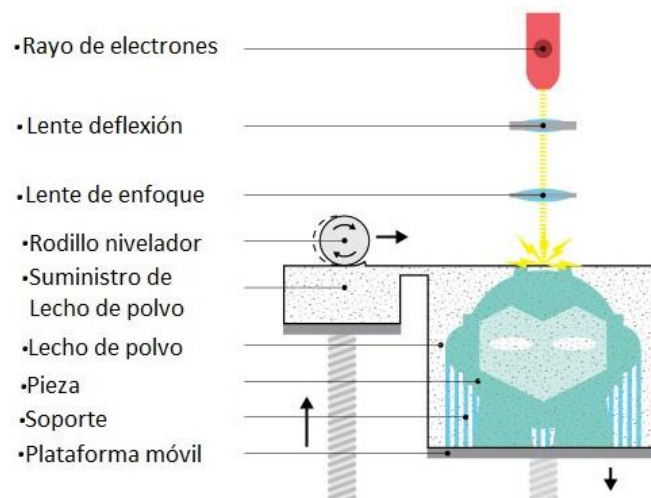


Figura 2-12: funcionamiento de una impresora (EBM) – Fuente: [3dhubs.com](https://3dhubs.com)


A continuación, se detallan los pasos a seguir para realizar una impresión (EBM):

1. Se dispone de dos cajas unidas, una de suministro de lecho de polvo (llena) y la otra de impresión (vacía). Las dos cajas disponen de plataformas móviles, de las cuales, la de suministro se situará en la parte inferior y la de impresión en la parte superior de la caja.
2. La plataforma de la caja de suministro asciende y la de la caja de impresión desciende, una altura correspondiente al espesor de la primera capa. Posteriormente, un rodillo arrastra el material en polvo de la caja de suministro y lo desplaza a la caja de impresión creando así un lecho de polvo.
3. Un haz de electrones que genera alta intensidad golpea sobre el lecho de polvo para fundir el material en una zona determinada. El haz cambia de dirección gracias a una lente de deflexión según las coordenadas indicadas y es enfocado mediante un lente de enfoque.
4. Una vez completando el primer ciclo, el proceso se vuelve a repetir. Hay tantos ciclos como capas requiere la pieza para completar la totalidad de la pieza.

Los materiales utilizados para esta impresión son los que se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.8: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (EBM) – Fuente: [arcam.com](https://arcam.com)

| Nombre                              | Descripción / Aplicación  | Composición   |
|-------------------------------------|---|---|
| Ti6Al4V<br>Titanium                 | Es utilizado para piezas y prototipos para carreras, industria aeroespacial, biomecánica, aplicaciones marinas, industria química y turbinas de gas.      | Aluminio, vanadio, carbón, hierro, oxígeno, nitrógeno, hidrogeno y titanio.   |
| Ti6Al4V ELI<br>Titanium             | Es utilizado para implantes biomédicos, componentes aeroespaciales. Instalaciones criogénicas, equipos offshore y aplicaciones marinas.                   | Aluminio, vanadio, carbono, hierro, oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, titanio.   |
| Arcam ASTM<br>F75 Cobalt-<br>Chrome | Es utilizado en ortopedia, industria aeroespacial, prótesis dentales, tuberías de gas, boquillas de combustible en motores, turbinas de gas industriales. | Cromo, molibdeno, níquel, hierro, carbono, silicona, manganeso, tungsteno, fósforo, azufre, nitrógeno, aluminio, titanio, boro y cobalto. |

|                  |   |  |
|------------------|---|--|
| Grade 2 Titanium | <p>Es utilizado en ortopedia, piezas de fuselaje, motores de avión, componentes marinos en contacto con químicos, tubería de condensador e intercambiadores de calor</p> <p><b>Ejemplo:</b> implante de cráneo</p>  | Carbono, hierro, oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, titanio. |
|------------------|---|--|

#### • Fusión selectiva por láser (SLM)

Las bases del funcionamiento de la impresión SLM se muestran en la ilustración figura 2.13.

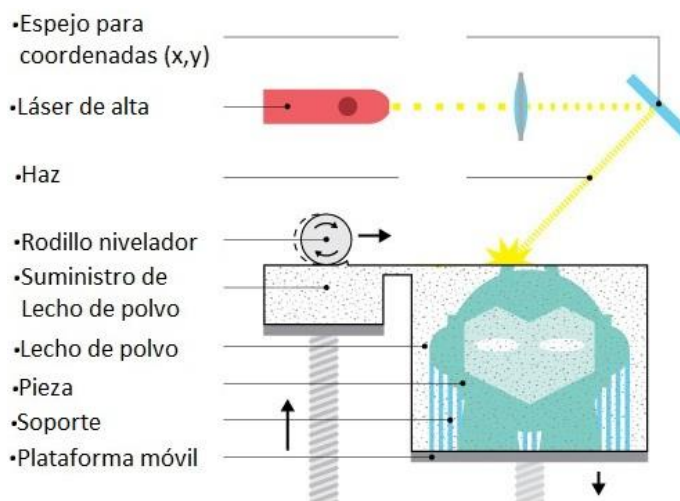


Figura 2-13: funcionamiento de una impresora (SLM) – Fuente: [3dhubs.com](http://3dhubs.com)


A continuación, se detallan los pasos a seguir para realizar una impresión (SLM):

1. Se dispone de dos cajas unidas, una de suministro de lecho de polvo (llena) y la otra de impresión (vacía). Las dos cajas disponen de plataformas móviles, de las cuales, la de suministro se situará en la parte inferior y la de impresión en la parte superior de la caja.
2. La plataforma de la caja de suministro asciende y la de la caja de impresión desciende, una altura correspondiente al espesor de la primera capa. Posteriormente, un rodillo arrastra el material en polvo de la caja de suministro y lo desplaza a la caja de impresión creando así un lecho de polvo.
3. Un rayo de láser de alta intensidad es enfocado mediante un sistema de lente y reflejado por un espejo según las coordenadas indicadas, para fundir el material en polvo y crear la primera capa.
4. Una vez completando el primer ciclo, el proceso se vuelve a repetir. Hay tantos ciclos como capas requiere la pieza para completar la totalidad de la pieza.

Los materiales utilizados para esta impresión son los que se muestran en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (SLM) – Fuente: [concept-laser.de](http://concept-laser.de)

| Nombre   | Descripción / Aplicación  | Composición  |
|----------|---|--|
| CL 92 PH | Es utilizado para Prototipos resistentes a ácidos y corrosión, piezas de producción únicas o en serie en plantas (ingeniería), industria automotriz, tecnología médica y componentes para moldes. | Carbono, manganeso, fosforo, azufre, silicio, cromo, níquel, cobre, niobium - tantalum y hierro. |

|                   |  |  |
|-------------------|--|--|
| CL 20 ES          | Es utilizado para fabricar prototipos resistentes a ácidos y corrosión y piezas de producción únicas o en serie en plantas (ingeniería), industria automotriz, tecnología médica y componentes para moldes.<br><br><b>Ejemplo:</b> conducto de escape  | Cromo, níquel, molibdeno, manganeso, silicio, fósforo, carbono y hierro.   |
| CL 30AL & CL 31AL | Es utilizado para la producción de prototipos ligeros y piezas de producción únicas o en serie en el campo de la automoción y en la industria aeroespacial.  | Silicio, magnesio, hierro, manganeso, titanio, cobre, zinc, carbono, níquel y plomo.   |
| CL 41TI ELI       | Es utilizado para fabricar prototipos ligeros, piezas de producción únicas en competición, industria aeroespacial y tecnología Médica.   | Hierro, oxígeno, carbono, nitrógeno, hidrógeno y titanio.  |
| CL 101NB          | Es utilizado para la producción de piezas sometidas a altas temperaturas como por ejemplo, turbinas o tubos de escape de carreras.   | Cromo, niobio – tantalum, molibdeno, hierro, titanio, aluminio, cobre, carbono, manganeso, silicio, fósforo, azufre, níquel. |

#### • Sinterizado selectivo por láser (SLS)

Las bases del funcionamiento de la impresión SLS se muestran en la figura 2.14.

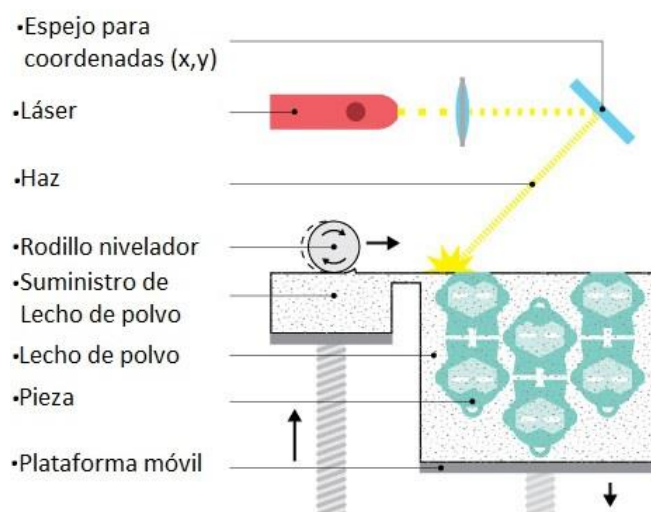


Figura 2-14: funcionamiento de una impresora (SLS) – Fuente: [3dhubs.com](http://3dhubs.com)

A continuación, se detallan los pasos a seguir para realizar una impresión (SLS):


1. Se dispone de dos cajas unidas, una de suministro de lecho de polvo (llena) y la otra de impresión (vacía). Las dos cajas disponen de plataformas móviles, de las cuales, la de suministro se situará en la parte inferior y la de impresión en la parte superior de la caja.
2. La plataforma de la caja de suministro asciende y la de la caja de impresión desciende, una altura correspondiente al espesor de la primera capa. Posteriormente, un rodillo arrastra el material en polvo de la caja de suministro y lo desplaza a la caja de impresión creando así un lecho de polvo.



3. Un rayo láser UV es enfocado mediante un sistema de lente y reflejado por un espejo según las coordenadas indicadas para sintetizar el material en polvo y crear la primera capa.
4. Una vez completando el primer ciclo, el proceso se vuelve a repetir. Hay tantos ciclos como capas requiere la pieza para completar la totalidad de la pieza.

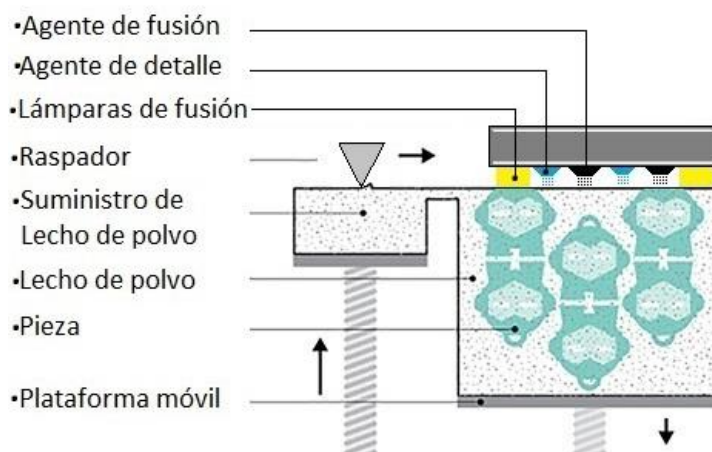
Los materiales utilizados para esta impresión son los que se muestran en la Tabla 2.10.

*Tabla 2.10: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (SLS) – Fuente: [sinterit.com](http://sinterit.com)*

| Nombre      | Descripción / Aplicación  | Composición   |
|-------------|---|---|
| FLEXA Grey  | Es utilizado para artículos de goma estándar, prototipos, amortiguadores y protectores.   | Poliuretano termoplástico (TPU), polvo a base de carbono. |
| PA11 Onyx   | Es utilizado para Jigs, accesorios, elementos de herramientas, cubiertas, diseños a presión, manijas, bisagras, conectores, elementos a prueba de impactos y moldes de termoformado.<br><br><b>Ejemplo:</b> carcasa  | Poliamida 11, polvo a base de carbono.                    |
| PA12 Smooth | Es utilizado para impresiones detalladas, formas espaciales complejas, elementos estructurales o mecánicos, prototipos funcionales o partes finales y objetos resistentes a químicos.   | Poliamida 12, polvo a base de carbono.                    |

#### • Fusión de múltiples chorros(MJF)

Las bases del funcionamiento de la impresión MJF se muestran en la figura 2.15.



*Figura 2-15: funcionamiento de una impresora (MJF) – Fuente: [3dhubs.com](http://3dhubs.com)*

A continuación, se detallan los pasos a seguir para realizar una impresión (MJF):

1. Se dispone de dos cajas unidas, una de suministro de lecho de polvo (llena) y la otra de impresión (vacía). Las dos cajas disponen de plataformas móviles, de las cuales, la de suministro se situará en la parte inferior y la de impresión en la parte superior de la caja.

2. La plataforma de la caja de suministro asciende y la de la caja de impresión desciende, una altura correspondiente al espesor de la primera capa. Posteriormente, un rodillo arrastra el material en polvo de la caja de suministro y lo desplaza a la caja de impresión creando así un lecho de polvo.
3. Un cabezal de impresión, imprime agentes de fusión y de detalle a lo largo del lecho de polvo en forma de gotas de una única pasada. Los agentes de fusión permiten la unión de las partículas y los agentes de detalle permiten modificar la fusión, crear detalles precisos y superficies pulidas.  
Posteriormente la zona en la que se han aplicado los agentes se expone a energía de forma precisa para que el material se fusione de forma selectiva para crear la pieza.
4. Una vez completando el primer ciclo, el proceso se vuelve a repetir. Hay tantos ciclos como capas requiere la pieza para completar la totalidad de la pieza.

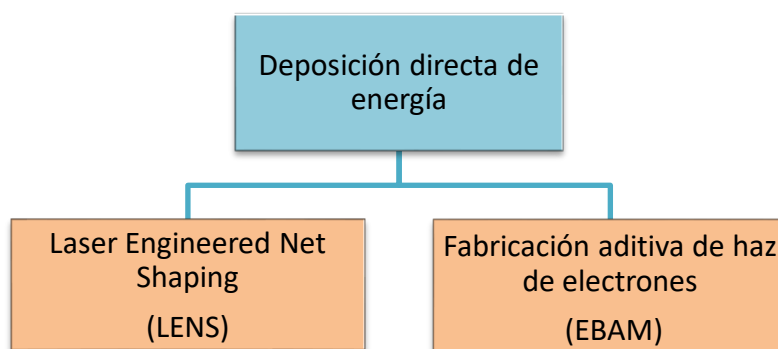
Los materiales utilizados para esta impresión son los que se muestran en la Tabla 2.11.

*Tabla 2.11: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (MJF) – Fuente: [www8.hp.com](http://www8.hp.com)*

| Nombre                             | Descripción / Aplicación   | Composición   |
|------------------------------------|--|---------------|
| High Reusability PA 12             | Es utilizado para producir piezas robustas de calidad al más bajo coste.<br><br><b>Ejemplo:</b> conducto de salida  | No disponible |
| VESTOSINT® 3D Z2773 PA 12          | Es utilizado para la producción de piezas sólidas con un diseño ligero en la estructura y gran uniformidad de color.   | No disponible |
| High Reusability PA 12 Glass Beads | Es utilizado para producir piezas rígidas de calidad al más bajo coste.  | No disponible |
| High Reusability PA 11             | Es utilizado para producir piezas dúctiles de calidad al más bajo coste.   | No disponible |

## 2.2.6 Deposición directa de energía

Esta técnica de impresión, presenta dos variantes diferentes que se mostraran a continuación en la figura 2.16.



*Figura 2-16: esquema resumen de la impresión por deposición directa de energía – Fuente: propia*



## • Laser Engineered Net Shaping (LENS)

Las bases del funcionamiento de la impresión LENS se muestran en la figura 2.17.

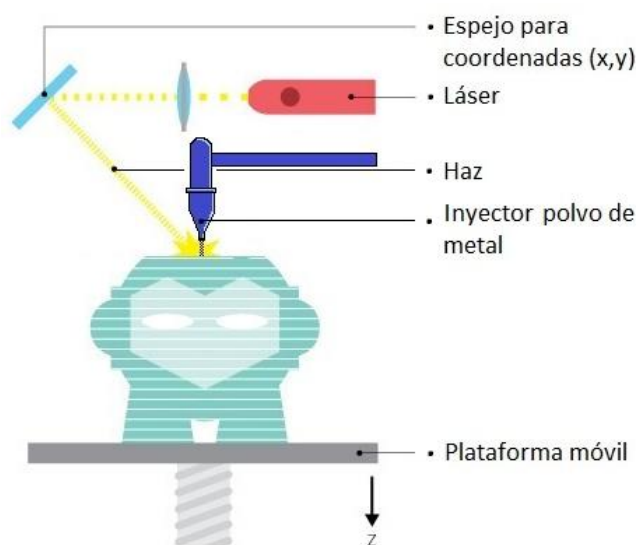


Figura 2-17: funcionamiento de una impresora (LENS) – Fuente: [3dhubs.com](http://3dhubs.com)

A continuación, se detallan los pasos a seguir para realizar una impresión (LENS):

1. En este sistema, se introduce polvo de metal en la plataforma de impresión a través de un inyector para que simultáneamente, un rayo láser de alta intensidad funda el material inyectado creando así una pequeña piscina fundida.
2. Esta operación, se repetirá en todos los puntos indicados según las coordenadas establecidas, para cubrir toda la superficie correspondiente a la primera capa de la pieza.
3. Después de finalizada la primera capa, la plataforma de impresión, descenderá un nivel, concretamente el del espesor de la capa creada anteriormente permitiendo así poder superponer una nueva capa.
4. Una vez completando el primer ciclo, el proceso se vuelve a repetir. Hay tantos ciclos como capas requiere la pieza para completar la totalidad de la pieza.

Los materiales utilizados para esta impresión son los que se muestran en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (LENS) – Fuente: propia

| Nombre                      | Descripción / Aplicación  | Composición  |
|-----------------------------|---|--|
| LENS 316<br>Stainless Steel | Se utiliza para equipos químicos, accesorios para barcos, tuercas y tornillos, resortes, implantes médicos.   | Carbono, cromo, manganeso, molibdeno, níquel, fósforo, silicio y azufre.   |
| LENS Inconel®<br>625        | Se utiliza en el procesamiento, ingeniería aeroespacial y marina, equipos de control de la contaminación.   | Carbón, níquel, cromo, silicio, manganeso, azufre, fósforo, molibdeno, titanio, cobalto, columbio - tantalio y aluminio. |
| LENS Ti-6Al-4V              | Se utiliza en una amplia gama de aplicaciones en las que son necesarias una baja densidad y una excelente resistencia a la corrosión, como la industria aeroespacial, | Titanio, aluminio y vanadio.   |

|  |  |  |
|--|--|--|
|  | marina, automotriz, energética, química y biomédica. |  |
|--|--|--|

- **Fabricación aditiva de haz de electrones (EBAM)**

Las bases del funcionamiento de la impresión EBAM se muestran en la figura 2.18.

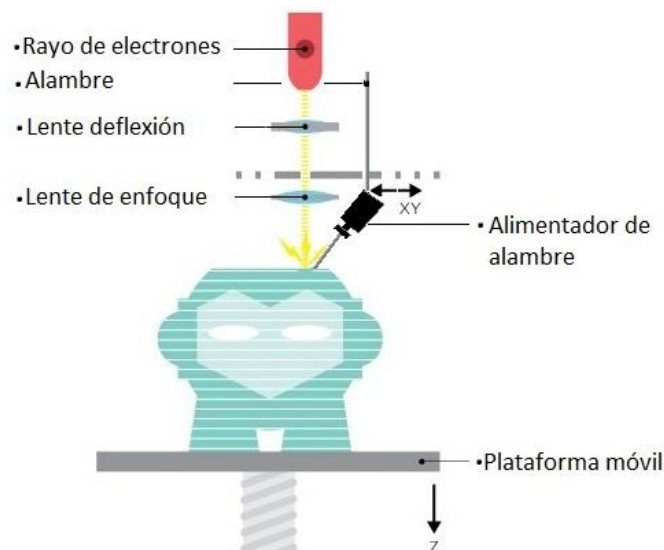


Figura 2-18: funcionamiento de una impresora (EBAM) – Fuente: [3dhubs.com](http://3dhubs.com)

A continuación, se detallan los pasos a seguir para realizar una impresión (EBAM):

4. En este sistema, se introduce alambre en la plataforma de impresión a través de un alimentador para que simultáneamente, Un haz de electrones golpee sobre el alambre para fundirlo en una zona determinada.
5. En este sistema, la deposición de material, se repetirá en todos los puntos indicados según las coordenadas establecidas, para cubrir toda la superficie correspondiente a la primera capa de la pieza.
6. Después de finalizada la primera capa, la plataforma de impresión, descenderá un nivel, concretamente el del espesor de la capa creada anteriormente permitiendo así poder superponer una nueva capa.
7. Una vez completando el primer ciclo, el proceso se vuelve a repetir. Hay tantos ciclos como capas requiere la pieza para completar la totalidad de la pieza.

Los materiales utilizados para esta impresión son los que se muestran en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (LENS) – Fuente: propia

| Nombre        | Descripción / Aplicación  | Composición   |
|---------------|---|---|
| 4043 Aluminum | Se utiliza en piezas de automóviles, camiones, bicicletas etc.                          | Aluminio, silicio, hierro, cobre, manganeso, magnesio, zinc, titanio y berilio. |
| 4340 Steel    | Se utiliza en Aeronaves comerciales y militares, sistemas automotrices, engranajes etc. | Carbón, manganeso, fósforo, azufre, silicio, níquel, cromo y molibdeno.         |

|                     |  |                 |
|---------------------|--|-----------------|
| 70-30 Copper Nickel | Se utiliza en tuberías de agua salada, cuerpos de válvulas, palas de hélice, partes de bombas, tanques, depósitos. | Cobre y níquel. |
|---------------------|--|-----------------|

## 2.2.7 Impresión por laminación de piezas

### • Fabricación mediante laminado de objetos (LOM)

Las bases del funcionamiento de la impresión LOM se muestran en la figura 2.19.

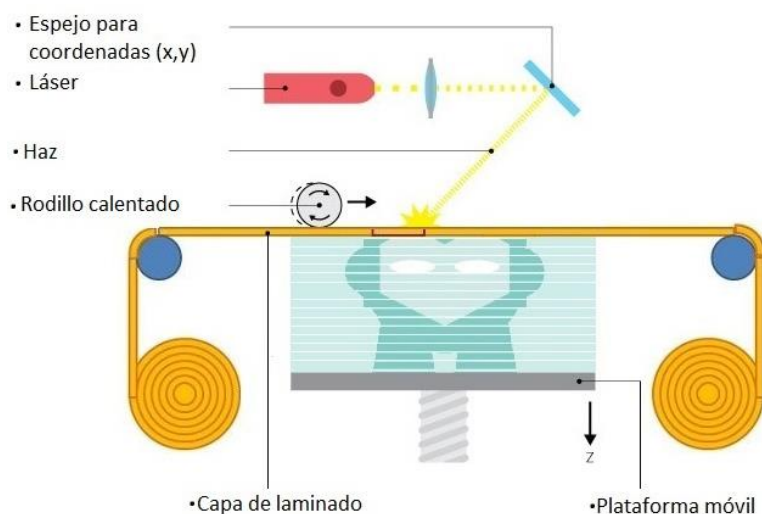


Figura 2-19: funcionamiento de una impresora (LOM) – Fuente: [3dhubs.com](http://3dhubs.com)

A continuación, se detallan los pasos a seguir para realizar una impresión (LOM):

1. Se extiende una laminada de material recubierta de adhesivo en la plataforma de impresión.
2. Un láser, cortará el contorno de la primera capa de la pieza, para ello, se enfocará el haz del láser mediante un sistema de lente para posteriormente, ser reflejado por un espejo según las coordenadas indicadas.
3. Después de finalizada la primera capa, la plataforma de impresión, descenderá un nivel, concretamente el del espesor de la capa creada anteriormente permitiendo así poder superponer otra lámina adhesiva por encima.

El material sobrante permanecerá en su lugar para de esta manera soportar la pieza.

4. La unión de la nueva capa se realizará mediante un rodillo calentado. Para que la unión sea mejor, la plataforma se elevará levemente permitiendo que el rodillo pueda ejercer más presión.
5. Una vez completando el primer ciclo, el proceso se vuelve a repetir. Hay tantos ciclos como capas requiere la pieza para completar la totalidad de la pieza.

Los materiales utilizados para esta impresión son los que se muestran en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14: información sobre materiales de impresión 3D para impresoras (LENS) – Fuente: propia

| Nombre | Descripción / Aplicación   | Composición                                     |
|--------|--|---|
| -      | Se puede utilizar en la Fabricación de piezas acabadas y prototipado funcional para la industria aeroespacial, defensa, petrolera, manufacturera y deportes a motor. | Fibra de carbono y poliéter éter cetona (PEEK). |

|   |   |  |
|---|---|--|
| - | Se puede utilizar para herramientas fuertes pero livianas, incluidas las industrias de fabricación recreativa, automotriz y aeroespacial. | Fibra de carbono y nylon 12                    |
| - | Se puede utilizar en colectores, partes de camiones, autobuses, aviones, trenes y aplicaciones marinas.                                   | Fibra de vidrio y poliéter éter cetona (PEEK). |
| - |   | Fibra de vidrio y nylon 12.                    |

### 2.3 Tabla comparativa de impresoras 3D

En este apartado y ya para finalizar el capítulo, se realizará una comparativa de los diferentes tipos de tecnología de impresión mencionados en el apartado 2.2.

Las impresoras escogidas en esta comparativa, son de uso profesional, puesto que una parte de los sistemas mencionados, solo disponen de este tipo de modelos en el mercado.

En este caso, las características que se tendrán en cuenta para realizar la comparativa son las siguientes.

- **Soporte:** para algunos tipos de impresión, es imprescindible su uso, estos suelen colocarse en partes en las que la pieza queda al aire, es decir, cuando la capa superior no dispone del apoyo de la capa inferior para sostenerse y por ende cae por efecto de la gravedad obligando al usuario a colocar un punto de apoyo para asegurar la integridad estructural de la pieza como es el caso de puentes, voladizos y cavidades.

A la hora de colocar un soporte en una estructura es conveniente que sea fácil su extracción una vez la pieza está finalizada para de esta manera evitar perder tiempo.

Actualmente, en el mercado se dispone de diversos tipos de soporte, como pueden ser el fabricado con el mismo material que el utilizado en la construcción de la pieza o materiales PVA que se disuelven con agua.

La generación de soportes se suele realizar habitualmente de manera automática con programas que detectan las zonas conflictivas en las que se debe colocar el soporte. Este proceso también se puede realizar de forma manual siempre y cuando se disponga del conocimiento adecuado.



Figura 2-20: ejemplo de soportes para impresión aditiva– Fuente: [twitter.com](https://twitter.com)

- **Volumen de fabricación:** Es el tamaño máximo al que la impresora puede imprimir, es decir, ocupa las dimensiones máximas del espacio destinado a realizar la impresión (alto x ancho x largo). Se suele medir cm<sup>3</sup>.

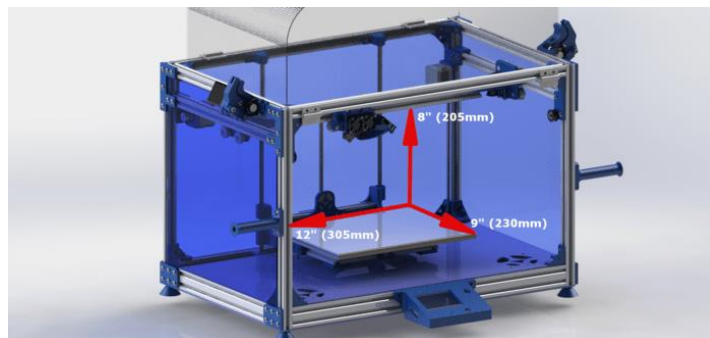


Figura 2-21: ejemplo de volumen de fabricación – Fuente: [kickstarter.com](https://www.kickstarter.com)

- **Resolución de capa:** Es básicamente la altura de la capa, la cual es definida por el eje z. Se suele medir  $\mu\text{m}$ .

En la mayoría de los casos, es uno de los métodos más habituales utilizados para conocer cómo será el acabado final de la pieza, contra más pequeña sea la altura de la capa, más detallada será la impresión, puesto que la pieza tendrá un acabado final más suave.

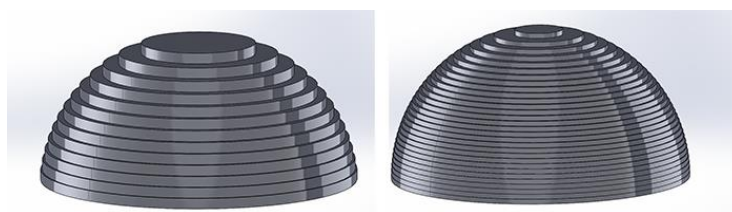


Figura 2-22: ejemplo de cómo afecta a la pieza la altura de capa – Fuente: [Creatu3D.com](https://www.creatu3d.com)

- **Precio:** En el mercado actual podemos encontrar una gran variedad de precios, estos dependerán del tipo de material, dimensiones, tecnología, precisión, resolución, rendimiento etc.  
En este caso, las impresoras a comparar tal y como se ha explicado al inicio de este apartado, son de uso profesional, por tanto, dentro de su propia categoría, tendrán los precios más altos.

- **Velocidad:** un aspecto importante a la hora de escoger una impresora es la velocidad, cada impresora está diseñada para un fin diferente, ya sea para prototipos, diseños finales, producción en serie etc.

La velocidad puede variar según la gama de la impresora y del sistema que utilice ya que presentará diferentes peculiaridades como puede ser el tipo de material y el tipo de impresión.

Otro aspecto a tener en cuenta, es que la velocidad mantiene una estrecha relación con la resolución de capa, puesto que contra menos grosor de capa, se requerirá un mayor número de capas para completar la pieza y esto a su vez conlleva a que la pieza tarde más en completarse.

Por tanto, es importante a la hora de escoger una impresora que esta tenga una buena relación velocidad – resolución capa.

Una muestra de cómo varía la calidad de impresión con respecto a la velocidad y la Resolución de capa se puede apreciar en la figura 2.23, donde se puede ver de forma visible en los zooms incorporados en las imágenes.

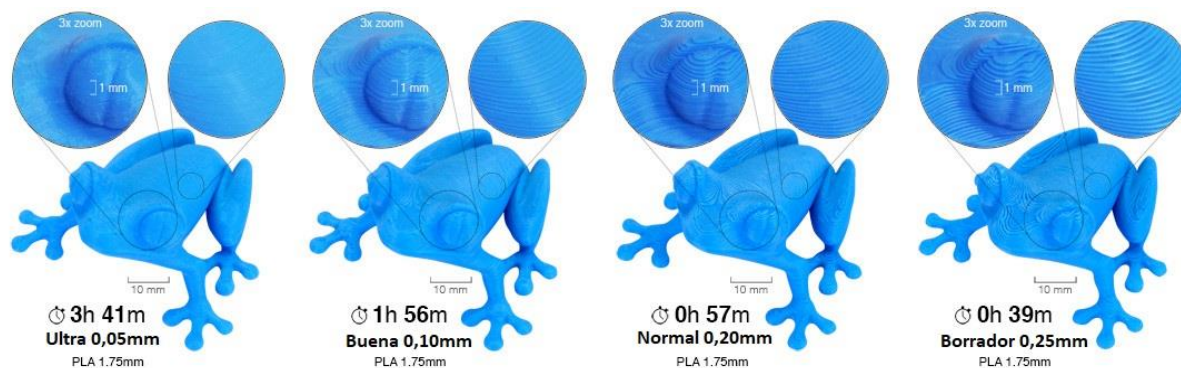


Figura 2-23: ejemplo de cómo varía la velocidad con el grosor de capa – Fuente: [shop.prusa3d.com](http://shop.prusa3d.com)

Teniendo en cuenta estas características, en la tabla 2.15 se mostrará cuáles son los parámetros que se han seguido para elaborar la comparativa tabla 2.16. También hay que considerar que algunos de los fabricantes no muestran todas sus especificaciones, por tanto, algunos de los datos utilizados para realizar la comparativa de la tabla 2.16, son aproximaciones obtenidas en sitios web que pueden ser de alguna manera diferentes de los originales. Los parámetros de velocidad, no se mostrarán en la tabla 2.15, esto es debido algunos de los valores proporcionados por los fabricantes no se pueden relacionar entre sí, por tanto, para determinar la escala de velocidad, se han tenido en cuenta las calificaciones proporcionadas en artículos profesionales y a su vez, estas han sido comparados con los datos especificados en los folletos oficiales.

- **Parámetros para evaluar el análisis final de los distintos sistemas de impresión:**

Tabla 2.15: parámetros para evaluar el análisis final de los distintos sistemas de impresión – Fuente: propia

| Volumen de fabricación | MUY PEQUEÑO | PEQUEÑO        | NORMAL          | GRANDE       | MUY GRANDE  |
|------------------------|-------------|----------------|-----------------|--------------|-------------|
| Litros                 | 0 - 10      | 11 - 100       | 101 - 500       | 501 - 1000   | +1001       |
| Resolución de capa     | MUY FINA    | FINA           | NORMAL          | ROBUSTA      | MUY ROBUSTA |
| $\mu\text{m}$          | 0 - 10      | 11 - 25        | 26 - 50         | 51 - 100     | +101        |
| Precio                 | MUY BAJO    | BAJO           | NORMAL          | ALTO         | MUY ALTO    |
| Dólares                | 0 – 10k     | (10,01 – 100)k | (100,01 – 250)k | (251 – 750)K | +750K       |



- **Análisis final de los distintos sistemas de impresión:**

*Tabla 2.16: Análisis final de los distintos sistemas de impresión – Fuente: propia*

| Sistema        | Soporte | Volumen de fabricación | Resolución de capa | Precio   | Velocidad | Ejemplo                            |
|----------------|---------|------------------------|--------------------|----------|-----------|------------------------------------|
| <b>SLA</b>     | SI      | GRANDE                 | NORMAL             | ALTO     | NORMAL    | <b>3D Systems ProX-950</b>         |
| <b>DLP</b>     | SI      | MUY PEQUEÑO            | FINA               | BAJO     | MUY ALTA  | <b>EnvisionTEC Prefactory vida</b> |
| <b>CLIP</b>    | SI      | MUY PEQUEÑO            | MUY FINA           | NORMAL   | MUY ALTA  | <b>Carbon M1</b>                   |
| <b>FDM</b>     | SI      | PEQUEÑO                | MUY ROBUSTA        | ALTO     | NORMAL    | <b>Stratasys Fortus 450mc</b>      |
| <b>Polyjet</b> | SI      | NORMAL                 | MUY FINA           | ALTO     | ALTA      | <b>Stratasys Object 1000 Plus</b>  |
| <b>NPJ</b>     | SI      | PEQUEÑO                | MUY FINA           | ALTO     | NORMAL    | <b>XJet X Carmel 1400</b>          |
| <b>BJ</b>      | NO      | NORMAL                 | NORMAL             | MUY ALTO | BAJA      | <b>ExOne M-Print</b>               |
| <b>MJF</b>     | NO      | PEQUEÑO                | ROBUSTA            | NORMAL   | BAJA      | <b>HP Jet Fusion 4210</b>          |
| <b>SLS</b>     | NO      | PEQUEÑO                | NORMAL             | ALTO     | NORMAL    | <b>Prodway ProMaker P4500 SD</b>   |
| <b>SLM</b>     | SI      | PEQUEÑO                | MUY FINA           | MUY ALTO | BAJA      | <b>SLM 500 HL</b>                  |
| <b>EBM</b>     | SI      | PEQUEÑO                | NORMAL             | MUY ALTO | NORMAL    | <b>ARCAM A2X</b>                   |
| <b>LENS</b>    | SI      | MUY GRANDE             | MUY ROBUSTA        | MUY ALTO | MUY BAJA  | <b>LENS 850-R</b>                  |
| <b>EBAM</b>    | SI      | MUY GRANDE             | MUY ROBUSTA        | MUY ALTO | BAJA      | <b>EBAM 110 System</b>             |
| <b>LOM</b>     | NO      | NORMAL                 | MUY ROBUSTA        | MUY ALTO | NORMAL    | <b>EnvisionTEC Slcom1</b>          |

## Capítulo 3 : Aplicación actual por sector

A día de hoy la fabricación aditiva tiene un gran peso en el desarrollo de productos y procesos.

Las empresas en la actualidad en muchos casos optan por este tipo de tecnología para llevar a cabo el pre-desarrollo de una amplia gama de productos, con el fin de buscar la pieza perfecta.

Antiguamente, la manera utilizada por los fabricantes para realizar sus prototipos era mediante los métodos actualmente denominados como convencionales, tales como el moldeo por inyección y extrusión, o moldeo por soplado. Estos sistemas de prototipado, a no ser que se tuviera una elevada producción, resultaban poco económica, y en algunos proyectos de bajo presupuesto, el prototipo tenía un bajo margen de mejora debido a los altos costes.

Actualmente, las empresas buscan que sus productos sean lo más eficientes posible, para ello es imprescindible la utilización de técnicas modernas que ayudan a cumplir estos resultados como es el caso de la optimización topológica, la cual trata del análisis mecánico de un componente o estructura para reducir la cantidad de material a utilizar a la mínima antes de afectar la estructura y perder la funcionalidad, reduciendo así los costes de producción y el peso al mínimo.

Otro ejemplo sería el diseño generativo, proceso de búsqueda de formas que mediante una computadora, nos permite alcanzar el diseño deseado mediante la resolución de problemas imitando el enfoque evolutivo de la naturaleza, de esta manera se obtienen prototipos personalizados que se ajustan perfectamente al cliente al que va destinado y a la función requerida.

Los métodos convencionales a la hora de aplicar estas diversas técnicas no resultan tan precisos y efectivos, por ello la implementación de la impresión 3D permite realizar estos prototipos con mayor facilidad, debido a su flexibilidad y prototipado rápido.

En este apartado se mostrarán algunos de los ejemplos más relevantes a día de hoy de la aplicación de este sistema en la fabricación teniendo en cuenta los diversos ámbitos de la vida. La intención de este apartado es la de mostrar de una forma resumida cual es el cambio que ha supuesto la impresión aditiva en los principales sectores, para así cuando se analice en profundidad este tipo de tecnología aplicada en el sector naval, se pueda tener una idea aproximada del nivel de evolución en el que se encuentra. Por tanto, en este apartado no se hará referencia a ningún elemento del sector naval, puesto que ello, está destinado a ser mostrado de una forma más amplia en el capítulo 4.

### 3.1 Deportes

En la actualidad, la impresión 3D está empujando hasta los límites el mundo de los deportes. Ya son muchas las empresas de impresión 3D que a día de hoy ofrecen sus productos y colaboran en conjunto con empresas de diferentes disciplinas dentro de la industria del deporte generando así una gran competencia.

Un claro ejemplo de que la impresión 3D puede desempeñar un papel importante lo encontramos en los deportes a motor en los cuales se llegan a invertir grandes cantidades de capital. Pongamos por ejemplo el caso de Renault y su modelo R.S.2027 Vision. La empresa francesa en conjunto con 3D Systems y mediante técnicas de modelado topológico que mejoran el peso y la aerodinámica, produjo 600 piezas



en una semana con tan solo cinco personas llegando así a mostrar el futuro de lo que puede ser la fórmula 1.

Otro ejemplo que muestra la importancia de la impresión 3D lo encontramos en los deportes en los que se busca mejorar las limitaciones físicas del ser humano tal y como hizo la atleta Allyson Felix en colaboración con Nike Sport Reserch Lab al crear las zapatillas Nike Zoom Superfly Flyknit las cuales cuentan con 70 picos diferentes fabricados mediante la tecnología SLS para crear un calzado perfectamente compatible que aumente el potencial de la atleta.

También se ha visto una mejora notable a la hora de crear prótesis para atletas discapacitados como es el caso de Denise Schindler, ciclista paraolímpica a la que se le fabrico una prótesis personalizada de pierna en un proyecto que contó con el apoyo de Autodesk en el cual se le realizo un escaneo laser para medir el muñón y posteriormente atreves del software Fusion 360 y tras 52 versiones, desarrollar la prótesis perfecta para poder competir.

En conclusión, la impresión 3D, ha logrado en muchos casos superar las limitaciones que hasta hace unos años los métodos convencionales debido a la complejidad y costes de fabricación, todo esto con el fin de poder batir records y alcanzar la cima gracias a la capacidad de poder producir productos personalizados y de alto rendimiento mediante métodos innovadores los cuales podemos visualizar y modificar tantas veces como queramos sin apenas coste ninguno para después crear productos finales de buena calidad.



*Figura 3-1: ejemplo de calzado impresos por Nike – Fuente: [runfun.net](http://runfun.net)*

**Ejemplos:** prótesis para atletas con discapacidad, espinilleras, refuerzos de brazo, cascos de futbol, protectores bucales, palos de golf, caretas para nariz fracturada, zapatillas para atletas, cuadros de bicicletas, manillares de bicicletas, esquís, piezas para coches de carreras etc.

### 3.2 Medicina

Existen diversas partes de la medicina que utilizan sistemas de impresión 3D como herramienta de fabricación. Pese a que en algunos casos esta tecnología se encuentra en desarrollo, en otros ya se ha avanzado hasta el punto de ser imprescindible por su facilidad de uso y buenos resultados.

Uno de los campos en los que la impresión 3D goza de mayor popularidad es la odontología. A día de hoy es habitual encontrar empresas especializadas que disponen de modelos especialmente creados con este fin, este sistema de impresión ha demostrado una gran compatibilidad a la hora de fabricar diversos tipos de modelos dentales con gran precisión y sin necesidad de crear moldes. Con solo escanear la boca del paciente y mediante un software especializado, se puede obtener en poco tiempo productos personalizados con multitud de materiales a costes más bajos.

Los ejemplos más claros que destacan que la impresión 3D ya está revolucionando el mundo de la medicina lo encontramos en las prótesis.

A día de hoy, la impresión 3D permite crear prótesis a medida de todo tipo tal y como se muestra en el apartado 3.1. También permite reducir costes de fabricación hecho que favorece a muchos pacientes como en el caso de la ortopedia infantil, la cual requiere una gran suma de dinero modificar la prótesis a medida que el niño crece.

Otro de las cosas que se espera conseguir en un futuro, se trata de los injertos. Uno de los casos más recientes de este tipo de uso se ha dado en el Instituto de Medicina Regenerativa Wake Forest donde mediante las células epiteliales de un paciente, se logra crear piel mediante la bio-impresión. Este sistema lo que hace es escanear la herida e imprimir mediante una pipeta guiada las células vivas llamadas bio-tinta sobre la zona a tratar de forma precisa y simulando la estructura de la piel mediante la superposición de capas.

En conclusión, la impresión 3D a actualmente ha demostrado una gran utilidad en muchos tipos de aplicaciones, y se espera que a largo plazo se pueda modificar completamente la forma en la que se trata a los pacientes, en especial, uno de los puntos a los que se le está prestando especial atención, es la bio-impresión la cual se espera que pueda ayudar a tratar gran variedad de casos de trasplantes que en la actualidad requieren de donantes y largas listas de espera.

**Ejemplos:** audífonos, material quirúrgico, medicamentos personalizados, implantes dentales, fundas dentales, implantes de cráneo, implantes de mandíbula, prótesis de pierna, prótesis de cara, oreja biónica, racimos de células madre, vasos sanguíneos, prototipos de órganos etc.



*Figura 3-2: ejemplo de prótesis infantil de bajo coste– Fuente: [frax3d.com](http://frax3d.com)*

### 3.3 Transporte

Para que los fabricantes obtengan resultados satisfactorios en un entorno competitivo como es el sector del transporte, es importante que se cumplan una serie de condiciones que permitan sacar ventaja respecto a los posibles competidores. Estos por ejemplo son la resistencia de las piezas fabricadas o la ligereza de las mismas, construyendo así productos que no generen una resistencia innecesaria.

Si analizamos el sector del transporte, una de los elementos que han ayudado a cambiar de una manera positiva la forma de concebir los productos que se presentan, es la fabricación aditiva. El uso de esta tecnología, está creciendo a una velocidad sorprendente. Prueba de ello, son la amplia gama de materiales que se han desarrollado para este fin y que se han adaptan perfectamente para competir con los empleados en los tipos de fabricación convencionales.

En la actualidad, gracias a esta tecnología, es posible desarrollar diferentes proyectos de geometrías de todo tipo para la fabricación prototipos de bajo coste, fabricación de productos personalizados para el uso final y la reproducción de piezas de recambio para restaurar o reparar todo tipo de vehículos.

Un ejemplo de ello, es la fabricación del coche LSEV de la empresa italiana, X Electrical Vehicle (XEV) o el bus autónomo Olli con tecnología de conducción autónoma de la empresa Local Motors en conjunto con IBM Watson. En estos dos casos, a diferencia de otros fabricantes que solo fabrican algunas piezas mediante la fabricación aditiva para crear componentes más livianos y complejos, estos dos vehículos están impresos casi en su totalidad, además de estar previsto que se produzcan en masa como es el caso del LSEV.

También podemos encontrar proyectos como el neumático indestructible que no contiene aire en su interior del grupo francés Michelin. Su finalidad es la de mediante un diseño inspirado en la naturaleza de nido de abeja, crear un neumático fabricado de materiales biodegradables y reciclados capaz de adaptar su banda de rodadura al clima y a la carretera.

Por último y no menos importante, tenemos el sector aeroespacial, el cual es uno de los primeros en adoptar el sistema de fabricación aditiva, para de esta manera crear partes más técnicas que cumplan los estrictos requisitos que a menudo son requeridos en este tipo de industria. Gracias a esto, se ha podido ver una rápida evolución de esta tecnología que ha supuesto la introducción de nuevos métodos de diseño y materiales innovadores ultraligeros.

**Otros ejemplos:** pinza de frenos de coche, neumáticos, aletas de coche, luces traseras de coche, recambios de coche, chasis de moto, brazo oscilante de moto, aviones no tripulados, piezas para aviones comerciales etc.



*Figura 3-3: ejemplo de neumático impreso por Michelin – Fuente: [3dnatives.com](http://3dnatives.com)*

### 3.4 Arquitectura

Como uno de los primeros sectores en utilizar el diseño asistido computado (CAD) para diseñar edificios, los arquitectos, han sabido encontrar el potencial de la impresión aditiva. La principal función que las empresas le dan a este tipo de tecnología por su precisión y detalle, es la de la construcción de modelos y maquetas, pero esto no es lo único, pese a la dificultad existente a la hora de construir grandes estructuras mediante este sistema de fabricación, los arquitectos se han sabido adaptar y ya disponen de creaciones innovadoras.

A continuación, se presentan algunos de los proyectos más importante de este sector, empleando la fabricación aditiva, que a diferencia de la complejidad de construir diferentes estructuras mediante todo

tipo de refuerzos, vigas..., se mostrara como estas se pueden integrar como un único conjunto mediante este sistema de fabricación, facilitando mucho más la construcción.

En el primer caso, tenemos un edificio impreso en 3D de oficinas en los Emiratos Árabes Unidos, concretamente en Dubái. El proyecto nació para consolidar aún más el compromiso de este país con la fabricación aditiva y la innovación. Se trata de una oficina futurista de unos 823 metros cuadrados y un coste de aproximadamente 125.000 euros, fabricada con una mezcla especial de cemento y diversos materiales de construcción. Esta oficina fue fabricada en 17 días y tardo 2 días en realizarse la instalación. El edificio se diseñó en forma de arco, ya que de esta manera se garantizaba una mayor seguridad y estabilidad estructural.

En segundo lugar, tenemos la villa de ZhuoDa group. Se trata de una casa fabricada en módulos en China mediante una impresora XXL, que con solo pulsar un botón, es capaz de imprimir una casa en aproximadamente 10 días, según los ingenieros del proyecto, mediante métodos de fabricación tradicionales se tardaría un año en completarse. Esta casa consta de una estructura de dos pisos que según la empresa, son fabricados en su totalidad a partir de desechos agrícolas e industriales resistentes al agua y al fuego. Cada módulo pesa más de 100 kilogramos por metro cuadrado y soporta el peso de forma independiente, siendo capaz de soportar terremotos de magnitud 9.0. A la hora de realizar la construcción, esta se fabrica en un 90% en fabrica (módulos) y el 10% restante se monta in situ mediante grúas. Su precio estimado, es de unos 360 euros el metro cuadrado.

Para finalizar, tenemos un puente de acero fabricado totalmente mediante la fabricación aditiva, se trata de un proyecto arquitectónico desarrollado por la statup holandesa MX3D y que cuenta con el apoyo de Lenovo, Autodesk o Air Liquide. La impresión se llevó a cabo mediante una impresora con brazo robótico de metal que suelda el material gota a gota a una temperatura de 1.500 grados.



*Figura 3-4: ejemplo de casa impresa en China – Fuente: [3dnatives.com](http://3dnatives.com)*

**Ejemplos:** estructuras decorativas, casas, maquetas de arquitectura, pabellones, cabañas, puentes, oficinas etc.

## Capítulo 4 : Aplicación en el sector naval

Las embarcaciones, son uno de los medios de transporte más antiguos que existen. En la actualidad, ya sean barcos menores o mayores existen muchos tipos, desde embarcaciones de recreo (veleros, yates, motos de agua y botes) hasta los buques de transporte (buques de guerra, mercantes y especiales).

Se tiene indicios de que hace diez mil años ya se utilizaba este tipo de transporte mediante formas simples que empleaban los troncos de los árboles en su fabricación. Actualmente se dispone de métodos de fabricación más avanzados, producto de la constante evolución de la tecnología que se ha ido desarrollando a lo largo de los años, una de estas tecnologías es la impresión aditiva, pese a que a día de hoy se carece de algunos aspectos a la hora de fabricar embarcaciones como por ejemplo, las limitaciones que presenta a la hora de soportar grandes dimensiones como las que se suele ver en los barcos, eso no quiere decir que no sea posible trabajar con ella.

A continuación, se presenta en la figura 4.1, un esquema en el que se resumen todos los temas que se presentaran en el capítulo 4.

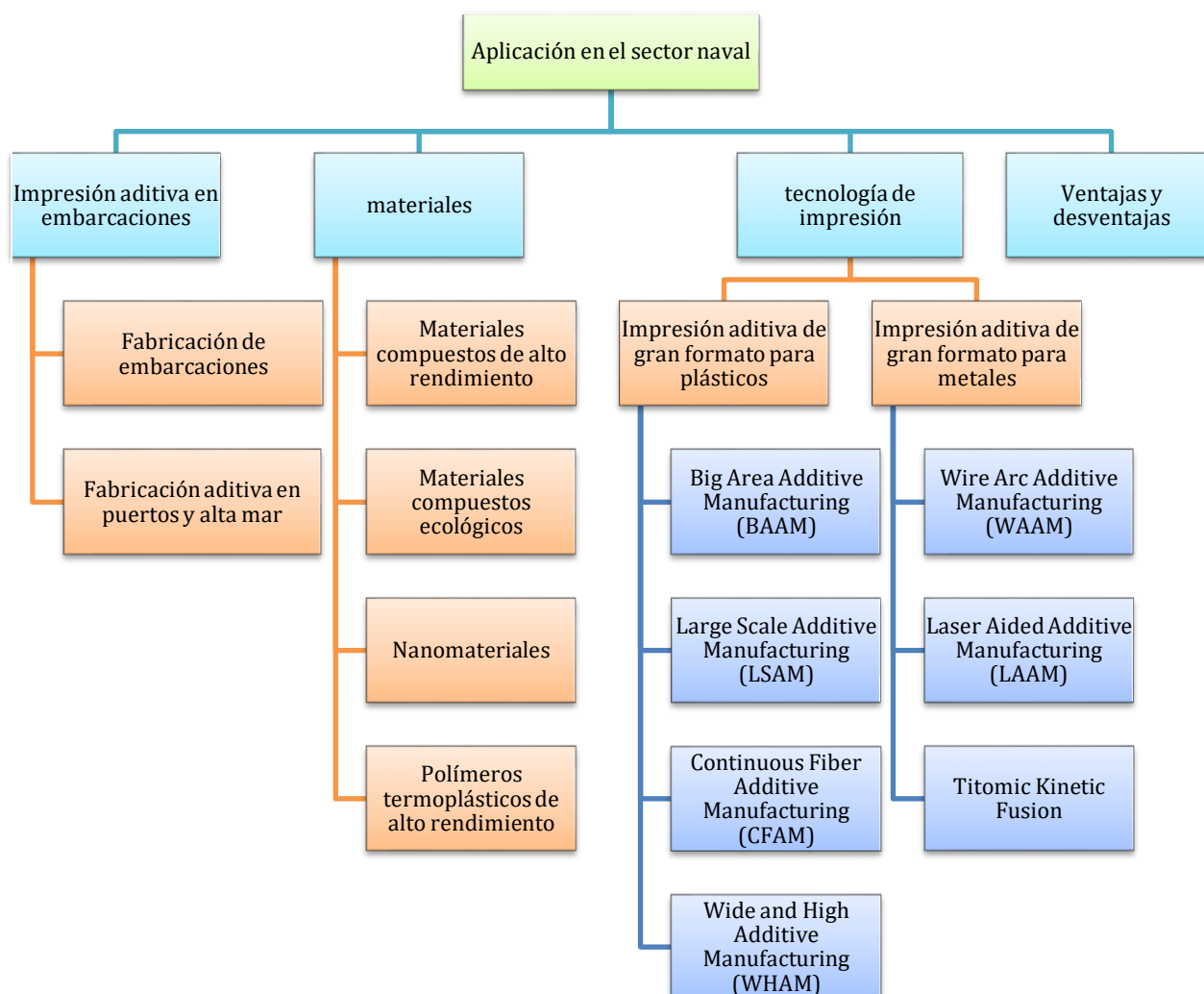
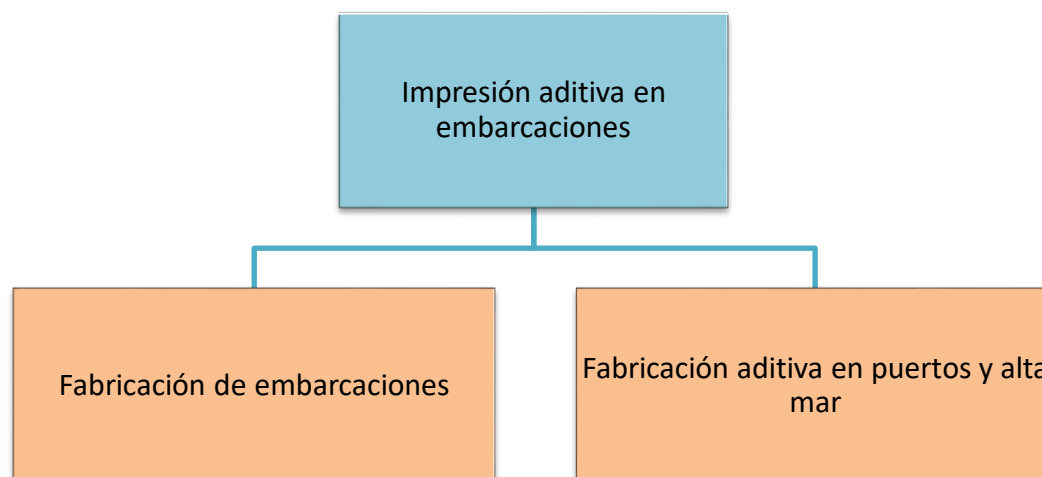


Figura 4-1: esquema del contenido del capítulo 4 aplicación en el sector naval – Fuente: propia

#### 4.1 Impresión aditiva en embarcaciones

En este apartado se conocerá algunos de los ejemplos de proyectos desarrollados para el sector naval que han demostrado que es posible aplicar la impresión aditiva en este sector, no son los únicos proyectos existentes, pero si son los más relevantes o se consideran suficientemente interesantes para ser añadidos.

A continuación, se presenta en la figura 4.2, un esquema que resume todos los casos que se presentaran en este apartado.



*Figura 4-2: esquema de Impresión aditiva en embarcaciones – Fuente: propia*

- **Fabricación de embarcaciones**

##### **Caso 1: Molde del casco de un barco**

El encargado de llevar a cabo este proyecto, es Stephen Wu, ingeniero de formación y ex ejecutivo de Microsoft en la década de 1990. Wu en el año 2016, anuncio que junto con su empresa XPlora Yachts LLC, había construir el molde del casco de un catamarán a motor de 34 (10,4m) con el objetivo de demostrar que la impresión aditiva tiene la capacidad de construir embarcaciones de una forma más rápida y barata respecto a los métodos tradicionales de mecanizado empleados para la construir de moldes hembra de fibra de vidrio.

Wu declaro en Kirkland, Washington que el motivo por el que había escogido realizar un molde, era porque que considera que es el paso más complicado y costoso en la producción de un barco y que con esta forma de construir se estima que los constructores obtendrán beneficios generales de entre 30% y el 80% simplificando el proceso de fabricación y reduciendo el tiempo de construcción.

Para este proyecto, Wu se inspiró en la forma de trabajar que se empleó en un proyecto que dirigió en la época en la que trabajo para Microsoft en el que ayudo a Boeing a desarrollar un sistema de gestión para el avión Boeing 777, ahí aprendió la disciplina de fabricación y a como cooperar a gran escala con cientos de subcontratistas, siguiendo con esta dinámica, realizó varias asociaciones, entre ellas con el Laboratorio Nacional Oak Ridge (ORNL) el cual le proporciono un acuerdo de usuario para poder acceder a uno de sus departamentos, el Manufacturing Demonstration Facility (MDF), en Knoxville, Tennessee, lugar donde pudo adquirir el conocimiento de cómo trabajar con impresoras de gran tamaño.



#### - Procesos de impresión:

Para la fabricación del molde del 34 se utilizó la impresora BAAM de Cincinnati. Las dimensiones de la impresora no permitían construir el casco en una sola pieza ya que sus dimensiones son de 2,44m de ancho, 6,10m de largo y 1,83m, es por ello que se decidió dividir el casco en 6 secciones.



*Figura 4-3: proceso de impresión de una de las secciones del molde del casco – Fuente: [proboat.com](http://proboat.com)*

Para facilitar la impresión del diseño de XPlora Yachts, se decidió que la forma más adecuada para imprimir las secciones del casco debía ser en vertical, también se tuvo que dividir cada sección en dos partes debido a que los bordes finos de la popa no facilitaban el acceso para el mecanizado, también se modificó el movimiento del cabezal de impresión en el eje z por problemas de limitación.

El material utilizado en el proceso fue acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Para mejorar la unión entre capas y controlar la distorsión térmica producida en el material, se añadió un 20% de fibra de carbono en forma de gránulos la cual no solo sirvió de unión entre capas, también aportó una mayor resistencia a la tracción respecto al material original. La cantidad total de material fue de 2.495 kg, con un coste de 27.500 dólares.

Para el extrusor, se utilizó una boquilla de 7,62 mm que produjo una altura de capa de de 3,81mm, además para el posterior mecanizado, se añadió un extra de material de 3,81 mm. La velocidad de impresión fue de 27,50cm/s con un caudal de 35,38kg/hr.

La duración total del proceso de impresión fue de 5 días de los cuales pese a no ser necesario y por motivos de supervisión se realizaron 2 turnos de 16 horas por día con una estimación de aproximadamente 12 horas por cada 3 secciones de molde y un coste de 150 dólares por cada hora.

#### - Proceso de mecanizado:

Posteriormente, se realizó el mecanizado de las diferentes secciones mediante una maquina CNC de cinco ejes y un rastreador de faro laser que se encargó de generar una nube de puntos de la sección del casco para mediante un software, diferenciar la parte impresa de la del molde a obtener.

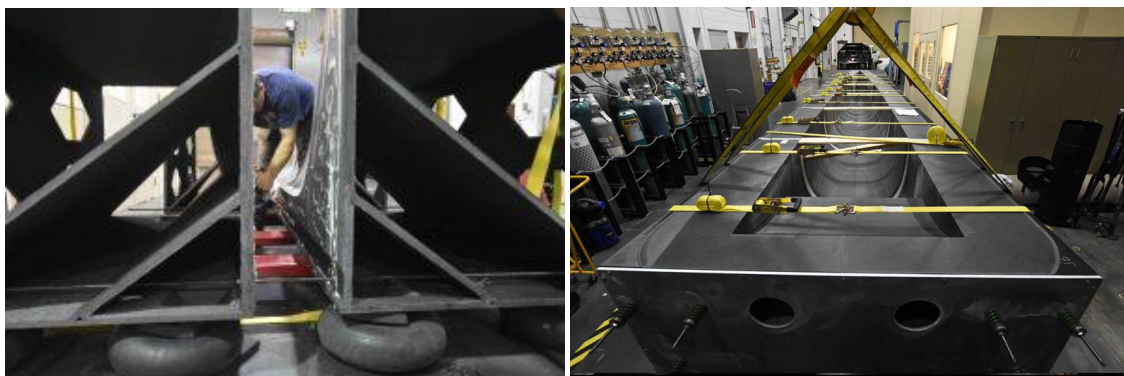


*Figura 4-4: mecanizado de una de las secciones del molde del casco – Fuente: [proboat.com](http://proboat.com)*

Para finalizar, los datos se cargaron en el software VisualMill, programa de mecanizado ideal para moldes que facilitó el mecanizado de las secciones y permitió obtener un acabado de superficie liso.

#### - Ensamblaje del molde:

Después de finalizar el mecanizado, se procedió a ensamblar las 12 piezas lisas que forman el molde, lo primero que se realizó fue unir las secciones divididas en dos (lado de babor y estribor). El ensamblaje se realizó con dos varillas roscadas que recorren toda la longitud de las secciones del molde, para mantener una mejor unión también se le añadió epoxi PlioGrip Plastic Repair 10 a las costuras, material especialmente compatible con el ABS y que además permitió un margen de 60 minutos hasta que empezó su curado, tiempo en el que los trabajadores ajustaron perfectamente el alineado de las secciones. El ensamblaje de cada sección duró aproximadamente 3 horas y el epoxi se curó completamente en 24 horas.



*Figura 4-5: procesos de ensamblaje de las secciones del molde del casco – Fuente: [proboat.com](http://proboat.com)*

Para finalizar el molde, se ensamblaron las 6 secciones de popa a proa. Para ayudar a distribuir la carga de las varillas tensoras de 4,536kg, se instalaron mamparos de aluminio y se atornillaron con varillas roscadas con resortes en los extremos que aseguraron una distribución de la carga uniforme.

Después de finalizar el molde, se realizó un escaneo de este para garantizar la calidad, para ello se utilizó un rastreador de faro láser, tras comparar los datos escaneados y el diseño CAD se mostró que tenía una desviación media de menos de 1,27mm.

La duración total del proceso de ensamblaje de las diferentes secciones fue de aproximadamente 2 a 3 días hasta su finalización.



#### - Infusión del casco:

Para finalizar, se realizó el proceso de infusión del molde impreso, la empresa encargada de esta tarea fue Composites Consulting Group, Desoto, Texas. Para esta empresa, pese a tener un largo recorrido y haber trabajado en una gran variedad de países, esta fue la primera vez que trabajaban con un molde de casco impreso en 3D. Según explico la gerente técnica regional de la empresa, fue más fácil trabajar con este tipo de molde puesto que tiene una geometría más agradable y accesible debido a la falta de estructuras externas que muestran los moldes convencionales.



*Figura 4-6: proceso de infusión del casco y partes acabadas del casco – Fuente: [proboat.com](http://proboat.com)*

Previamente a la infusión del molde se realizó un pulido por presión de aire con grano de 1500, luego se añadió un agente desmoldante para permitir la posterior extracción del casco.

El casco se realizó con tejido E-glass biaxial y Kevlar, con un núcleo estructural de espuma Divinycell HM de celdas cerradas de alta densidad. Para aportar mayor resistencia a las altas temperaturas debido al calor producido por la sala de máquinas, se incorporó un núcleo de espuma Divinycell HP de grado marino y se añadió epoxi resistente a altas temperaturas.

Para preparar el casco para la infusión, se colocó una bolsa de vacío durante la noche, posteriormente se inició el proceso de infusión el cual duro una hora. La resina epoxi se curó a una temperatura ambiente de 22,22°C.

#### Caso 2: Barco fabricado con impresión aditiva



*Figura 4-7: diseño del mini 650 de Livrea Yacht – Fuente: [proboat.com](http://proboat.com)*

A Francesco Belvisi y Daniele Cevola se les conoce por fundar en el año 2013 la empresa italiana Livrea Yacht en la cual diseñaron este proyecto. La construcción se realizó en OCORE, startup italiana también fundada por ellos en el año 2018, cuyo fin es el de mejorar las embarcaciones de alto rendimiento con nuevas e inusuales tecnologías como son la impresión aditiva.

El proyecto conto con el apoyo de la empresa Autodesk para la parte de diseño y optimización del modelo y con Lehvoss Group, empresa especializada en materiales que proporciono al proyecto los materiales personalizados más adecuados para la impresión.

- **Procesos de impresión:**



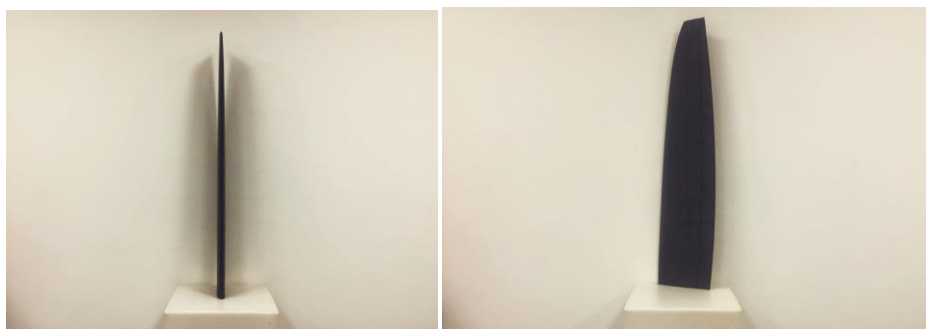
*Figura 4-8: procesos de fabricación del casco del mini 650 con el sistema OCORE – Fuente: [proboat.com](http://proboat.com)*

En la fabricación del mini 650, OCORE desarrollo y patento una impresora 3D a gran escala que une la tecnología aditiva y la robótica de la empresa KUKA Robotics para crear una variante de impresora FDM que utiliza material granulado en lugar de filamentos.

A la hora de imprimir el casco, por problemas dimensionales se decidió dividir la estructura en cuatro secciones que posteriormente serian unidas con un adhesivo estructural. Estas se crearon utilizando un diseño generativo optimizado con la ayuda de Autodesk que se basó en la forma utilizada en el sector aeroespacial llamada isogrid, esta forma se caracteriza por ser un tipo de estructura parcialmente hueca con costillas de refuerzo combinadas en formas triangulares, se decidió utilizar este tipo de estructura para agregar ligereza, rigidez torsional y resistencia a la flexión y al pandeo en el casco.

Para poder imprimir este tipo de diseño generativo, se desarrolló un nuevo software que traduce los resultados de los análisis de elementos finitos en un algoritmo que guía al robot a depositar el material. Para ello se contó con la ayuda de Alessandro Buscemi que se encargó de escribir el código del software en lenguaje Kuka Robot Language (KRL).

El material utilizado en la fabricación fue Luvocom 3F PAHT CF, este material tal y como se mencionó anteriormente, fue desarrollado por la empresa Lehvoss. Los materiales fueron sometidos a mejoras para agregar a la embarcación ligereza, durabilidad y para que tenga un extra de resistencia en las capas impresas evitando así que las secciones se deformen durante la fabricación, su diseño está basado en polímeros termoplásticos de alto rendimiento como el PEEK más un refuerzo de fibra de carbono llamado PA12.



*Figura 4-9: perfil frontal y lateral del timón del mini 650 de OCORE – Fuente: [twitter.com](https://twitter.com)*

Además de imprimir el casco, se imprimieron otros elementos del barco como son los dos timones, en este el caso, el proceso de impresión, a diferencia de los métodos convencionales en los que se requiere un molde, fue mucho más rápido, en aproximadamente 2 horas ya se disponía de una estructura autosuficiente. El timón acabado tiene un peso aproximado de 1,4 kilogramos y presenta dimensiones de 1,3 metros de alto, 30 centímetros de ancho y 3 centímetros de grosor, además su interior también dispone de una estructura interna con paredes de 1 milímetro que permitirán soportar mejor los esfuerzos de corte a los que se verá afectado en la navegación. Para finalizar, fueron revestidos con fibra de carbono unidireccional.

- **Fabricación aditiva en puertos y alta mar**

#### **Caso 1: hélice fabricada con impresión aditiva**

Si ya hemos visto que la construcción de un casco es posible gracias a la fabricación aditiva, en este caso se presenta la fabricación de WAAMPeller, la primera hélice conocida fabricada completamente con métodos de impresión.

Los encargados de llevar a cabo este proyecto, son el laboratorio holandés Rotterdam's Manufacturing Fiedlab (RAMLAB), iniciativa nacida de tres socios fundadores, el Puerto de Rotterdam, InnovationQuarter y RDM Makerspace. Para este proyecto, RAMLAB contó con la colaboración de diversas empresas como son Damen Shipyards Group y su barco remolcador Stan Tug 1606 en el cual posteriormente fue instalada la hélice, Promarin, empresa especializada en desarrollo, diseño y fabricación de hélices y Autodesk, aportando su gran conocimiento y tecnología en impresión aditiva y mecanizado.

La idea de RAMLAB, nació tras observar la necesidad de conseguir recambios en el puerto de Róterdam que tienen las embarcaciones averiadas. El puerto de Róterdam es considerado el más importante de Europa debido a su buena conexión hacia puertos internacionales, en el confluyen muchas embarcaciones y se gestionan aproximadamente 460 millones de toneladas de mercancías al año. El hecho de que en caso de avería, una embarcación esté parada semana e incluso meses, provocando grandes pérdidas económicas a las compañías navieras. Gracias a este proyecto, RAMLAB pretende crear un sistema de fabricación en puerto que facilite la obtención de recambios y de esta manera acelerar la reparación de las embarcaciones.

#### **- Procesos de fabricación:**

Para la fabricación de este proyecto se utilizó una impresora de fabricación aditiva basada en soldadura con arco Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) la cual cumplía con los requisitos de diseño y permitía la fabricación de grandes piezas de metal. La hélice se fabricó enteramente con una aleación de Níquel Aluminio Bronce y constó de 298 capas, el diámetro total de la hélice es de 1.350 milímetros y su peso aproximado es de 400 kilogramos.



Figura 4-10: procesos de fabricación de la hélice WAAMPeller con el sistema WAAM – Fuente: [damen.com](http://damen.com)

Para finalizar la fabricación de la hélice, esta fue sometida a un proceso de fresado y rectificado con una máquina CNC, la cual permitió lograr tolerancias dimensionales más estrechas sin perder precisión y rendimiento. Para este proceso, la hélice fue enviada a Advanced Manufacturing Facility en Birmingham, espacio propiedad de Autodesk destinado a facilitar a sus clientes todo tipo de herramientas de fabricación avanzada.

Antes de su puesta en marcha, la hélice fue sometida a las correspondientes pruebas de certificación de clase para su puesta en funcionamiento, de todas las pruebas a las que fue sometida la parte impresa no falló ninguno. El órgano certificador encargado de supervisar todo el proceso fue Bureau Veritas.



Figura 4-11: inauguración e instalación de la hélice – Fuente: [damen.com](http://damen.com)

## Caso 2: impresoras de fabricación aditiva en alta mar

- **Tecnología de escaneo e impresión en la armada holandesa.**

La armada holandesa, para realizar el mantenimiento (reparación, modificación y sustitución) en los barcos y submarinos, ha contratado a la compañía Marinebedrijf Koninklijke Marine, esta empresa se encarga de todo tipo de tareas, desde modificaciones en el casco a los sistemas de armas y motores.

Para esto, Marinebedrijf Koninklijke Marine ha empezado a emplear un sistema de ingeniería inversa de la empresa Artec 3D que emplea escáneres portátiles. El funcionamiento de estos escáneres, es que mediante la proyección sobre un objeto de una luz con un patrón de rejilla, se captura la deformación o distorsión de los diferentes ángulos de este objeto para posteriormente calcular las distancias de los puntos específicos que lo componen mediante métodos de triangulación. Gracias a esta tecnología, Marinebedrijf Koninklijke Marine ha podido ahorrar semanas de trabajo de replicado mediante herramientas de medición para poder conseguir los archivos CAD 3D de los componentes que deben ser reparados o sustituidos.





Figura 4-12: parte a escanear y modelo en formato CAD – Fuente: [artec3d.com](http://artec3d.com)

Según palabras de Andrei Vakulenko, director de desarrollo de Artec 3D, si en un futuro se incorporan en cada barco una impresora aditiva, este sistema de escaneo e impresora permitirá a las grandes embarcaciones que viajan en alta mar a poder solucionar las averías que se produzcan sin la necesidad de esperar a que lleguen piezas de repuesto desde la base de reparaciones.

- **Tecnología de impresión en la armada de Estados Unidos.**

El ejército de los Estados Unidos ya incorpora la impresión aditiva en sus diferentes ramas del ejército para ahorrar tiempo y dinero, un ejemplo de ello es el USS Chung-Hoon, en el año 2018 uno de los pernos del hangar que permitían que la puerta se abriera se rompió, este incidente que habitualmente requiere esperar a que llegue un perno nuevo, se resolvió rápidamente con la ayuda del portaviones USS John C. Stennis y su sistema de impresión aditiva.

Para la reparación, el personal que previamente había estado entrenado en el uso de la impresión aditiva diseñó un nuevo perno mediante un software CAD, una vez impresa la réplica del perno, esta fue enviada al USS Chung-Hoon para comprobar que el perno diseñado se ajustase bien. Teniendo el diseño del perno validado, mediante una máquina de mecanizado se fabricó la pieza definitiva.

Este no es el único caso en el que en el portaviones USS John C. Stennis se ha requerido de la impresión aditiva para solucionar un problema, por ejemplo, una de las máquinas de calibración del AIMD (Departamento de Mantenimiento Intermedio de Aviación) no funcionaba debido a la falta de un botón, para solventar este problema, se imprimió un botón de plástico que permitió poner de nuevo en funcionamiento la máquina, esta pequeña solución permitió ahorrar una gran cantidad de dinero gracias a una solución sencilla, rápida.

#### 4.2 Materiales para la fabricación aditiva

En el apartado de los materiales, se mostrarán los que por sus características, resulten más atractivos para el presente o futuro del sector naval, ya sea por un bajo coste que facilite la producción en menor o mayor medida, por sus propiedades mecánicas o por su capacidad de soportar estructuras de gran envergadura.

Puesto que no es habitual encontrar una cama calentada en este tipo de sistemas, se busca que los materiales a utilizar tengan una buena resistencia en su estado de fundición y una mínima contracción al enfriarse para evitar el hundimiento o deformación de la pieza a fabricar.

A continuación, se presenta en la figura 4.3, un esquema que resume todos los tipos de materiales que se presentaran en este apartado.

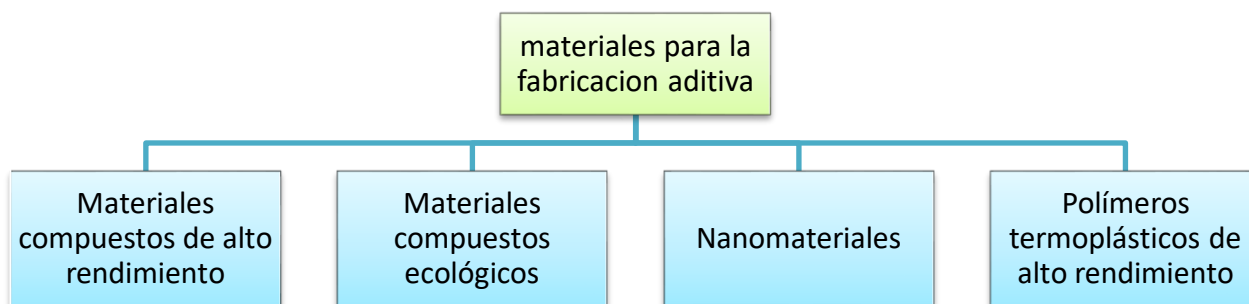


Figura 4-13: esquema de materiales para la aditiva en embarcaciones – Fuente: propia

### Materiales compuestos de alto rendimiento

**Compuestos de fibra de carbono o vidrio:** La forma que tienen algunos fabricantes de aditivos para conseguir materiales más ligeros, resistentes y con menor contracción durante el enfriamiento, es mediante la combinación de materiales termoplástico relleno de fibra o materiales termoplásticos reforzados con diminutas hebras de fibra. El porcentaje de fibra que se emplea en estos compuestos, viene determinado por el grado de rigidez o estabilidad dimensional requerida en el proyecto.

Un claro ejemplo de empresas que actualmente emplea este tipo de material compuesto en sus productos es SABIC con su línea de materiales THERMOCOMP AM que incluye compuestos basados en ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), PPE (polifenileno éter), PC (policarbonato) y PEI (polieterimida).

Esta misma empresa, hace unos años presento en conjunto con Autodesk y Livrea Yatch el primer ejemplo de impresión aditiva a gran escala al imprimir una sección del casco de un yate con materiales múltiples. En la impresión, se utilizó compuesto de PPE reforzado con fibra de carbono para la capa exterior del casco, y compuesto PEI reforzado con fibra de carbono para la estructura interna.



Figura 4-14: sección del casco de Livrea Yatch – Fuente: [tctmagazine.com](http://tctmagazine.com)

**Filamento de grafeno:** el llamado material del futuro para muchos, es un material compuesto por carbono puro con átomos dispuestos en forma de patrón hexagonal. La gran ventaja que ofrece este material, es su gran resistencia, ligereza, flexibilidad y una extraordinaria dureza.

Se espera que la incorporación del grafeno a la impresión 3D, suponga un gran avance en la fabricación gracias a sus múltiples beneficios. Una muestra de ello es GRAFYLON 3D, un filamento compuesto por un material base PLA junto con un refuerzo de grafeno.

La empresa encargada de sacar al mercado este material es Directa Plus en colaboración con la empresa de creación de filamentos para impresión aditiva Filoalfa. Los resultados de esta unión significaron una gran mejora en la conductividad térmica y un excelente acabado superficial, además el nuevo filamento

respecto al material base, vio su resistencia incrementada en un 34%, la fuerza de tensión aumentó un 23% y su elasticidad mejoró en 28%.

- **Materiales compuestos ecológicos:**

**WPC (Wood Plastic Composite):** Actualmente, el Centro de Composites UMaine de EE. UU. está desarrollando este material para ser aplicado al sector naval, se trata de un material compuesto económico que une polímeros termoplásticos como puede ser polietileno (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC) o ácido poliláctico (PLA) con un refuerzo del 50% fibra de madera o harina de madera

Imprimir piezas en 3D de grandes dimensiones resulta costoso, es por ello que añadir fibra de madera a los polímeros termoplásticos resulta más económico para los fabricantes, además, la adición de la fibra de madera aumenta la rigidez y la resistencia de los materiales al tiempo que reduce el impacto medioambiental gracias a la capacidad del material de poder ser reciclado.

Según estudios del Centro de Composites UMaine, este material en conjunto con la impresión aditiva, permitirá a los fabricantes producir moldes y herramienta para embarcaciones un 75% más rápido y reducirá hasta un 50% los costes de fabricación respecto a los métodos convencionales.

Gracias a este proyecto, el Centro de Composites UMaine ha recibido una subvención de investigación y desarrollo del Instituto de Tecnología de Maine (MTI) para formar un equipo especializado que permita explorar con la construcción de embarcaciones impresas en 3D y de esta manera fomentar y comercializar este tipo de tecnología en el sector naval.

**CNF-PLA:** Los encargados de desarrollar este material son los investigadores de ORNL, con el objetivo principal de incorporar productos verdes como son los biopolímeros y fibras de origen vegetal a la fabricación aditiva y que además sirvan como sustituto de productos no renovables derivados del petróleo.

El material desarrollado, es un compuesto destinado a sustituir la fibra de carbono-ABS por ácido poliláctico (PLA) a base de plantas reforzado con nanofibrillas de celulosa (CNF) de celulosa de plantas leñosas. El nombre que ha recibido este compuesto es CNF-PLA, y tras ser sometido a diferentes pruebas, ha demostrado ser más fuerte y más económico que el compuesto fibra de carbono-ABS

Con este proyecto, ORNL también espera apoyar y potenciar la agricultura de estados unidos a la vez que se potencia la fabricación de biocombustibles y biomateriales.

- **Nanomateriales:**

**Nano-TiB<sub>2</sub> (nanopartículas de diboruro de titanio):** Se trata de un material utilizado en un proyecto desarrollado en Singapur por la Agencia de Ciencia, Tecnología e Investigación (A\*STAR) que trata de la mejora de la impresión aditiva de supe aleaciones. La investigación se centra en diferentes tipos de impresión aditiva como son EBM, SLS, SLM, SLA, LAAM.

Para realizar este tipo de mejoras se añadió nano-TiB<sub>2</sub> a Inconel 625 (níquel que incluye cromo, molibdeno, hierro y niobio-tantalio). Según la investigación, esta mezcla en conjunto con el proceso de impresión LAAM logró excelentes propiedades dotando a la muestra de mayor dureza y resistencia al desgaste de la superficie.

Este tipo de mezcla, ha sido probada para crear palas de turbina, obteniendo grandes resultados. Según palabras de Guijun Bi uno de los expertos que trabajaron en el proyecto, la adición de nanopartículas a un material de base metálica, es una forma efectiva de mejorar las propiedades físicas, térmicas y mecánicas del material significativamente, así como de aportar gran resistencia al desgaste y a la corrosión.

- **Polímeros termoplásticos de alto rendimiento:**

**PAEK (poliariletercetona):** Se trata de una familia de plásticos semicristalinos cuyas características principales son su gran dureza y resistencia a las altas temperaturas, además de su bajo nivel de fuego, humo y toxicidad. Los tipos más conocidos de la familia PAEK, son el PEEK (poliéter éter cetona) y el PEKK (poliéter éter cetona cetona), dos materiales conocidos por su alta rigidez.

De estos dos tipos, el PEEK a día de hoy es el más conocido, pese a que no se trata de un material recientemente descubierto, el hecho de que con un peso un 80% más bajo sea tan fuerte como el acero, lo hace realmente popular para las empresas de aditivos.

Este tipo de material se suele utilizar en impresoras SLS y FDM, siendo esta última la más habitual. Gracias a sus grandes ventajas, se ha convertido en un material perfectamente compatible en aplicaciones de ingeniería, especialmente en la industria del transporte marino, terrestre y aéreo.

**ULTEM o PEI (polieterimida):** ULTEM es un material en muchos aspectos similar al PAEK que últimamente está ganando gran popularidad gracias a ser una alternativa más asequible a este. La diferencia de precio entre estos dos materiales radica en la falta de cetona de ULTEM. Al igual que el PAEK, no se trata de un material recientemente descubierto, y presenta grandes propiedades físicas como son su alta relación resistencia-peso y su capacidad retardante de llama, humo y toxicidad.

De igual manera que el PAEK, este tipo de material se suele utilizar en impresoras SLS y FDM, siendo esta última la más habitual. Gracias a sus grandes ventajas, se ha convertido en un material perfectamente compatible en aplicaciones de ingeniería, especialmente en la industria del transporte marino, terrestre y aéreo.

### 4.3 Impresión aditiva de gran formato

Actualmente tal y como se ha mostrado en el capítulo 2, existen muchos tipos de impresoras en el mercado que serían capaces de fabricar diferentes piezas para el sector naval, pero cuando hablamos de proyectos grandes no todos los sistemas de impresión son adecuados, para este tipo de construcciones los fabricantes suelen utilizar tecnología especialmente desarrollada para este fin.

En el caso de los plásticos, las impresoras que se presentaran, están basadas en el sistema FDM, la llamada Fabricación de aditivos de gran formato (LFAM), la cual trata de la fabricación de piezas de gran envergadura mediante la extrusión de material plástico fundido, además el extrusor suele estar montado en un pórtico XY o un brazo robótico de múltiples ejes. Los procesos de impresión se suelen dar en condiciones ambientales, por tanto, es habitual que este tipo de impresora realice un control térmico de cada capa.

Para los metales, de los sistemas mencionados anteriormente, podemos diferenciar tres tipos de sistema que serían válidos, métodos de fusión por fundición de lecho de polvo (SLM, EBM), método de pulverización de aglutinante líquido sobre lecho de polvo (BJ) y fundición por inyección de partículas o



varilla de metal (LENS, EBAM), de estos tres, y a excepción de algunas empresas como ExOne (BJ) que ya cuentan con modelos de mayor tamaño, se podría considerar que el más válido para la fabricación de grandes estructuras sería el último mencionado, ya que los dos anteriores se limitan al tamaño del lecho de polvo, son más costosos y en algunos casos producen piezas menos densas.

Debido a lo mencionado anteriormente, los sistemas de impresión aditiva de metal que se presentaran en este punto en su mayoría funcionarían de una forma similar al sistema LENS y EBAM. También destacar que el sistema EBAM a día de hoy como el sistema de impresión de metales a gran escala más vendido del mundo, ya ha sido probado en el sector naval, un ejemplo de ello es el desarrollo de un tanque de lastre variable de titanio para un vehículo submarino autónomo (AUV), proyecto desarrollado junto International Submarine Engineering (ISE) Ltd.

A continuación, se presenta en la figura 4.15, un esquema en el que resume todos los tipos de impresión de gran formato que se presentaran en este apartado.

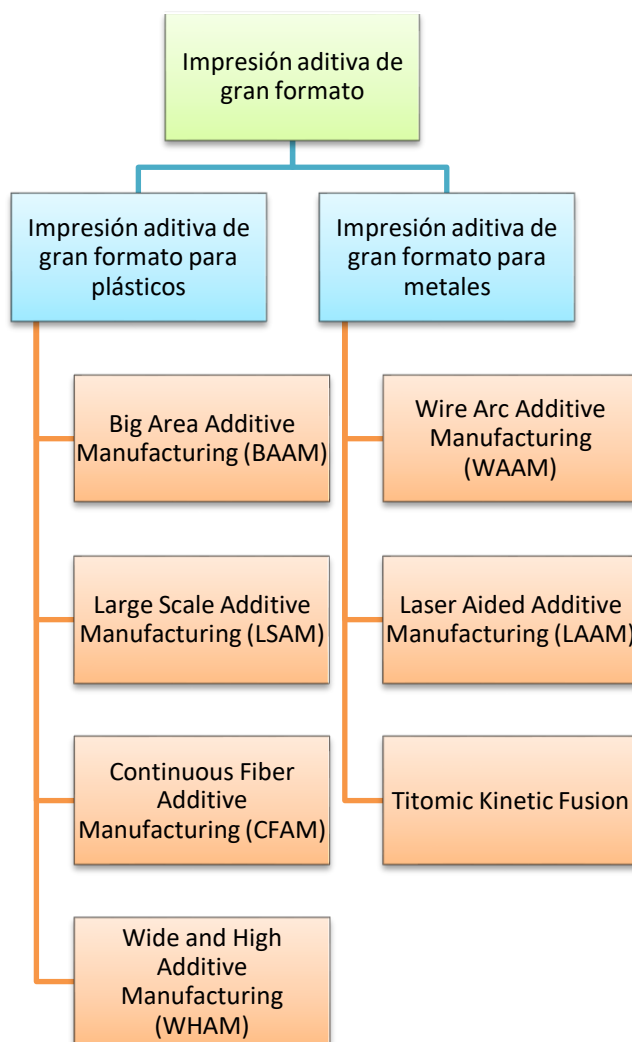


Figura 4-15: esquema de las impresoras de fabricación aditiva de gran formato – Fuente: propia

- **Impresión aditiva de gran formato para plásticos**

Los sistemas de fabricación aditiva de gran formato para plásticos que más importancia están teniendo o se prevé que la tendrán en un futuro en la fabricación de grandes estructuras, son los presentados a continuación:

- **Big Area Additive Manufacturing (BAAM)**



*Figura 4-16: fotografía del sistema de impresión BAAM – Fuente: [e-ci.com](http://e-ci.com)*

BAAM es una impresora de fabricación aditiva basado en el sistema FDM. Esta impresora en su salida el año 2014, fue considerada como la impresora más grande de fabricación de materiales termoplásticos, esto es debido a su capacidad de construcción de piezas hasta 10 veces más grandes que las que se producían en aquella época con una alta tasa de deposición de 36 kg/h. Los encargados de la construcción de esta impresora, son la empresa estadounidense Cincinnati Incorporated (Harrison, Ohio), empresa que previamente a este proyecto ya contaba con una amplia experiencia en el diseño, fabricación y control de sistemas de fabricación a gran escala. Para el proyecto también se contó con la colaboración de Laboratorio Nacional de Oak Ridge (ORNL).

Actualmente esta impresora dispone de tres tamaños de zona de trabajo de aproximadamente (3,5 x 1,6 x 1,8) m, (3,5 x 1,6 x 2,4) m y (6 x 2,3 x 1,8) m, en la cual se incorpora una estructura movida por motores lineales de pórtico que permite la deposición del material en un plano XY de forma rápida y precisa.



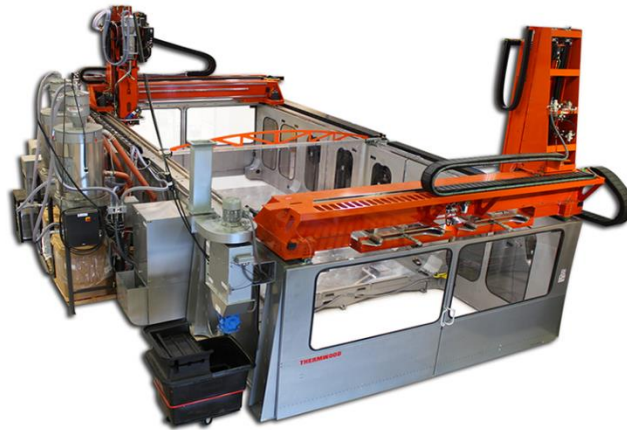
*Figura 4-17: zona de trabajo de la impresora BAAM – Fuente: [ornl.gov](http://ornl.gov)*

La impresora BAAM dispone de una amplia cartelera de materiales termoplásticos compatibles con su sistema de extrusión, entre ellos ABS, PPS, PC, PLA y PEI. Además, tiene la capacidad de trabajar con

materiales compuestos de diferentes fibras capaces de producir piezas duras y resistentes de gran envergadura.

Tal y como se muestra en el apartado 4.1, esta impresora ya ha sido utilizada en varios proyectos para el sector naval, entre los que se encuentran la fabricación del molde de un yate y el proyecto de la empresa OCORE en el cual se imprimió el mini 650.

- **Large Scale Additive Manufacturing (LSAM)**



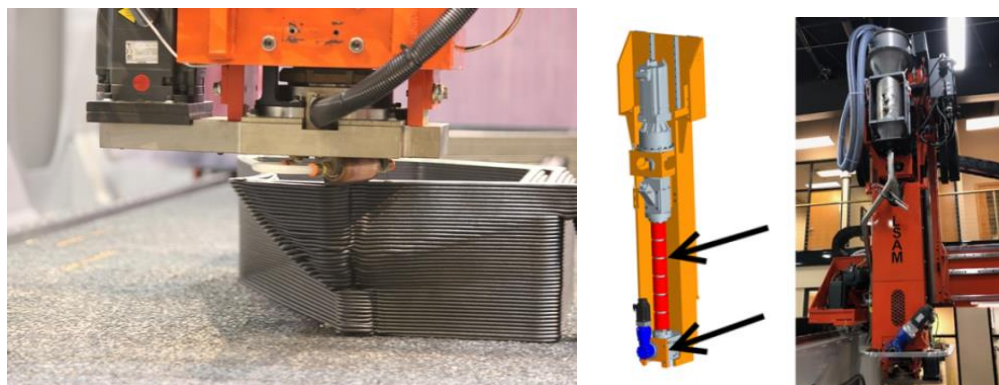
*Figura 4-18: fotografía del sistema de impresión LSAM – Fuente: [thermwood.com](http://thermwood.com)*

a impresora LSAM fue creada por la empresa con sede en Dale, Indiana, Estados Unidos Thermwood. Se trata de una impresora de fabricación aditiva basada en el sistema FDM diseñada especialmente para la fabricación de piezas de gran envergadura gracias a su capacidad de construcción de aproximadamente 3 metros de alto y 6 metros de ancho. Una de los elementos que incorpora esta impresora es un sistema de recorte que servirá para pulir y dar forma a las piezas impresas. Para mantener una buena limpieza en la cámara debido al sistema de recorte, esta impresora incorpora un sistema de extracción de humo, polvo y astillas estándar.

Para asegurar que la impresora tenga un buen rendimiento y que las piezas conserven la estructura de la pieza impresa sin deformaciones, la empresa Thermwood creó un sistema novedoso que permite que el proceso de impresión disponga de un enfriamiento controlado, este sistema lo que hace es en vez de imprimir un cordón pequeño en un ambiente calentado, imprime uno grande a temperatura ambiente gracias a un enfriamiento continuo. Un aspecto importante a destacar, es que el hecho de someter al cordón a un enfriamiento, no afecta la unión entre capas ya que todavía conserva la capacidad térmica necesaria según cada polímero para una correcta unión. Otro elemento que incorpora esta impresora para facilitar la unión entre capas, es una rueda de compresión instalada para que el cordón que sale de la boquilla de impresión sea aplanado permitiendo una fusión casi perfecta de las capas.

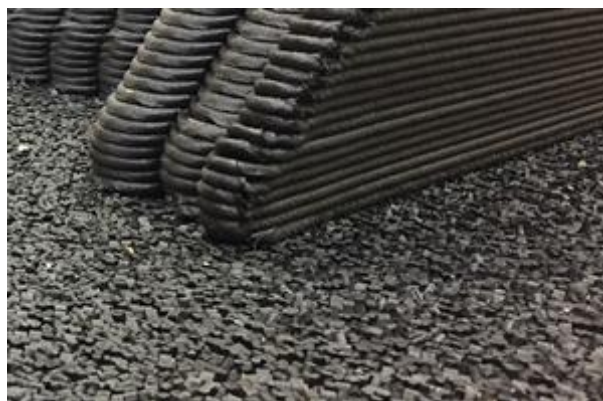
Para la adición de material, Thermwood creó un sistema personalizado de extrusión que a diferencia de los sistemas de extrusión de plástico tradicionales en los cuales se funde el material con los calentadores al pasar por el tornillo giratorio que presiona el material a la salida, el calor aportado al material proviene en más de un 60% de una bomba de extrusión que evita la acumulación de presión y permite que se transfiera más o menos calor al polímero según sea necesario. Con este sistema lo que se consigue es la capacidad de poder procesar diferentes polímeros de una forma más uniforme, hecho

que de otra manera no sería posible debido a que la velocidad de giro del tornillo en la fabricación aditiva está constantemente cambiando.



*Figura 4-19: rueda de compresión y sistemas de extrusión de plástico – Fuente: [thermwood.com](http://thermwood.com)*

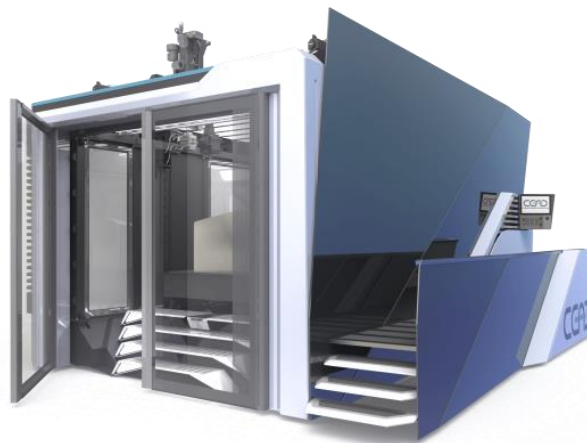
Uno de los problemas que se encontró Thermwood al tener en cuenta que posteriormente se realizaría el proceso de recorte en la misma impresora, fue que a diferencia de los sistemas FDM, esta impresora no podía incorporar una mesa caliente en la que se adheriera la pieza para evitar que se deforme debido a un enfriamiento desigual. En esta ocasión no era compatible con el sistema diseñado. Para solventar este inconveniente, Thermwood decidió crear un tablero patentado llamado “Bead Board” que básicamente consiste en un panel de madera contrachapada con gránulos de ABS incrustados que en el proceso de impresión se fusionaran con la parte impresa. Adicionalmente, al mismo tiempo que el propio calor de la impresión calienta los gránulos de ABS, también calienta el pegamento que sostiene los gránulos al panel de madera, de esta manera se facilita que los gránulos puedan moverse para eliminar las tensiones de enfriamiento provocadas cuando la pieza se enfría y se encoje. Una vez se termina el proceso, el pegamento se vuelve a endurecer manteniendo una superficie adecuada para el posterior recorte.



*Figura 4-20: panel de madera contrachapada con gránulos de ABS – Fuente: [thermwood.com](http://thermwood.com)*

A día de hoy, esta impresora ya ha demostrado tener un buen rendimiento en proyectos de grandes dimensiones para el sector naval, una muestra de ello es la fabricación a escala del molde de un yate de 2,1 metros de largo, la nariz a escala de un submarino de la Marina de los Estados Unidos y las seis secciones impresas del patrón de un barco para la fabricación del molde del modelo T16 de la empresa Tahoe.

#### - Continuous Fiber Additive Manufacturing(CFAM)



*Figura 4-21: fotografía del sistema de impresión CFAM – Fuente: [ceadgroup.com](http://ceadgroup.com)*

CFAM, es un sistema de fabricación aditiva basado en la impresión FDM. El desarrollo de esta impresora dio inicio a finales de 2017 por la empresa con sede en los Países Bajos, CEAD. La impresora CFAM puede tener un especial atractivo en clientes del sector marítimo para la fabricación de yates y barcos, ya que también en 2017 tras realizar un estudio de mercado para encontrar un cliente potencial para su lanzamiento, su primer cliente fue Poly Products BV, empresa especializada en la fabricación de productos compuestos de plástico reforzados con fibra para diferentes industrias entre las que se encuentra el sector naval.

La impresora CFAM actualmente es la impresora más grande fabricada en Europa. Dispone de un espacio de impresión completamente cerrado de 2 metros de ancho, 4 metros de largo y 1,5 metros de alto en el que también se incorpora una base de fresado CNC de 5 ejes de la empresa Siemens.

Uno de los aspectos a destacar de esta impresora además de su precisión a la hora de producir elementos grandes y complejos, es su velocidad de producción y su bajo coste de mano de obra. Esto es posible gracias a la automatización de la mayoría de los procesos permitiendo el funcionamiento de la impresora durante 24 horas sin la necesidad de la intervención del operador.

Esta impresora basa su funcionamiento en la impresión FDM mediante un sistema de extrusión que presenta una tasa de deposición promedio de 15 kg/h. Para asegurar una buena adhesión entre capas y para evitar la deformación de las piezas, la empresa CEAD se decantó por mantener un control de la temperatura del proceso mediante un sistema de calefacción inteligente controlado mediante cámaras térmicas que permiten el seguimiento del proceso en todo momento en tiempo real.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, esta impresora está diseñada para la fabricación de piezas que requieren un gran rendimiento mecánico, es por ello que a diferencia de otros sistemas que utilizan compuestos de termoplásticos con fibras, la impresora CFAM permite obtener piezas con mayor rigidez y rendimiento estructural, esto se logra gracias a su novedoso sistema de extrusión que permite que en el cabezal de impresión se mezclen a altas presiones gránulos de material termoplástico fundido con fibra de carbono o de vidrio. Pese a que no es la primera vez que se ve un sistema de extrusión con estas características, por su complejidad no es habitual verlo en la impresión aditiva.





Figura 4-22: zona de trabajo de la impresora y sistema de extrusión – Fuente: [ceadgroup.com](http://ceadgroup.com)

Aparte de la empresa Poly Products BV, los segundos clientes en utilizar la impresora de CEAD, son la empresa de ingeniería marina también de los Países Bajos Royal Roos, empresa la cual tiene previsto diversos proyectos para el sector naval tales como la construcción de pasarelas y modelos a escala de barcos para pruebas de resistencia y movimiento.

#### - Wide and High Additive Manufacturing (WHAM)

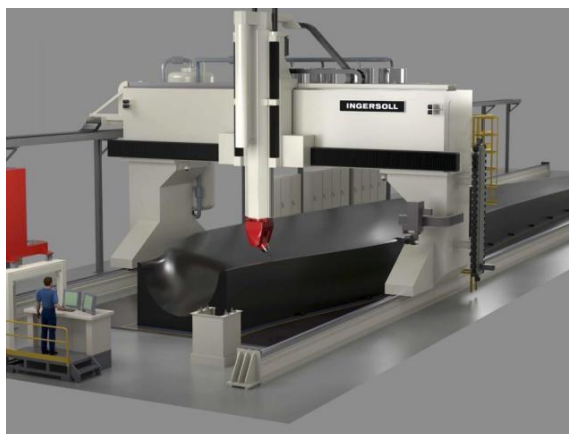


Figura 4-23: fotografía del sistema de impresión WHAM – Fuente: [additivemanufacturing.media](http://additivemanufacturing.media)

WHAM, es un tipo de impresora que basa su funcionamiento en el sistema de fabricación FDM. Esta impresora ha sido desarrollada por la empresa localizada en Rockford, Illinois Ingersoll Machine Tools en colaboración con el Laboratorio Nacional Oak Ridge (ORNL) y la empresa Strangresse con el objetivo de brindar a las diferentes industrias de transporte y energía una herramienta capaz de imprimir proyectos importantes de piezas y herramientas de gran envergadura, además para conseguir la geometría deseada por el cliente, permite la incorporación de un accesorio de fresado de 5 ejes de alta velocidad para operaciones de acabado sustractivo convencionales.

La impresora WHAM a día de hoy es considerada la impresora más grande del mundo, dispone de una zona de trabajo de aproximadamente 7 metros de ancho, 10 metros de alto y 14 metros de largo.

Según informó ORNL en un reporte publicado en marzo del 2017, esta impresora cuenta con dos tipos de tecnologías complementarias que evitan que los elementos impresos se vean sometidos a los diferentes contratiempos que conlleva la impresión de grandes piezas. El primer tipo, es la incorporación de un extrusor con una alta tasa de deposición. Para determinar la tasa que debe tener el extrusor, uno de los aspectos en los que se basa el equipo es en el tiempo y material que necesita una impresora con la tecnología actual, más concretamente la impresora BAAM en completar una capa

según los estándares de la WHAM. Teniendo en cuenta que para una capa típica con un grosor de 0,1  $\mu\text{m}$  y una longitud que puede exceder los 305 metros cuadrados la impresora BAAM necesita aproximadamente 227 kilogramos de material, si se establece un tiempo estimado 5 horas y considerando que para una buena adhesión de la capa el tiempo ideal del proceso debe ser de 30 minutos. El equipo llegó a la conclusión de que lo ideal era incorporar un extrusor con una tasa de deposición de 454 kg/h para lograr la adhesión deseada. El segundo tipo, es un sistema de calefacción localizada mediante infrarrojo con el objetivo de eliminar la necesidad de instalar una mesa caliente.

Otro de los aspectos que presenta esta impresora, es la incorporación de cuatro tolvas de aproximadamente 454 kilogramos cada una que permitirán el funcionamiento del sistema durante 4 horas. Una vez se vacía la tolva, el sistema cambia automáticamente a la siguiente tolva y estaciona la vacía a un lado para ser nuevamente repuesta.

- **Impresión aditiva de gran formato para metales**

Los sistemas de fabricación aditiva de gran formato para metales que más importancia están teniendo o se prevé que la tendrán en un futuro en la fabricación de grandes estructuras, son los presentados a continuación:

- **Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)**



*Figura 4-24: fotografía del sistema de impresión WAAM – Fuente: [waammat.com](http://waammat.com)*

WAAM es una impresora de fabricación aditiva para piezas metálicas de gran envergadura. Uno de los elementos que incorpora esta máquina junto con el sistema de impresión, es un brazo robótico que le proporciona un movimiento más libre y preciso.

El sistema WAAM guarda un gran parecido al sistema EBAM ya mencionado en el trabajo, puesto que los dos sistemas utilizan como materia prima el alambre, la diferencia entre ellos radica en que la impresora EBAM utiliza una fuente de calor controlada (haz de electrones) y la impresora WAAM genera un arco eléctrico mediante electrodos para fundir el material, en soldadura sería como comparar el sistema MIG=WAAM y el sistema TIG=EBAM.

El sistema de impresión tiene una tasa de deposición que suele estar entorno a los 3-8 kg/h, además dispone de una amplia gama de materiales en forma de alambre como son: acero inoxidable, aleaciones a base de níquel, aleaciones de titanio y aleaciones de aluminio.



Figura 4-25: proceso de impresión del sistema de impresión WAAM – Fuente: [waammat.com](http://waammat.com)

Una de las diferencias que caracterizan al sistema de impresión WAAM respecto los sistemas basados en lecho de polvo, es su alta velocidad y que pese a no producir piezas con una alta definición, puede producir piezas completamente densas y más grandes siempre y cuando no se supere la distancia de recorrido del brazo robótico, además la impresión con alambre de soldar resulta más barata que utilizar polvo de metal.

Según afirman algunos investigadores, las propiedades mecánicas de las piezas producidas por la impresora WAAM, pueden igualar o incluso superar las piezas producidas mediante métodos de forja y fundición hechas con el mismo material, alcanzando niveles de ductilidad y de resistencia apropiados y mayor resistencia a la fatiga.

España es uno de los países que a día de hoy dispone de una de estas impresora WAAM. Esta se encuentra en las instalaciones de Loxin en Pamplona, en las cuales se está desarrollando el llamado Large Additive Subtractive Integrated Modular Machine (LASIMM), un sistema masivo de construcción considerado como el más grande de Europa.

Una de las particularidades del sistema de construcción LASIMM, es la capacidad de unir de forma precisa mediante un software desarrollado por Autodesk, EL método de fabricación aditiva de metal WAAM y la fabricación sustractiva mediante un robot de fresado para eliminar el material sobrante y dar el acabado final a la pieza.

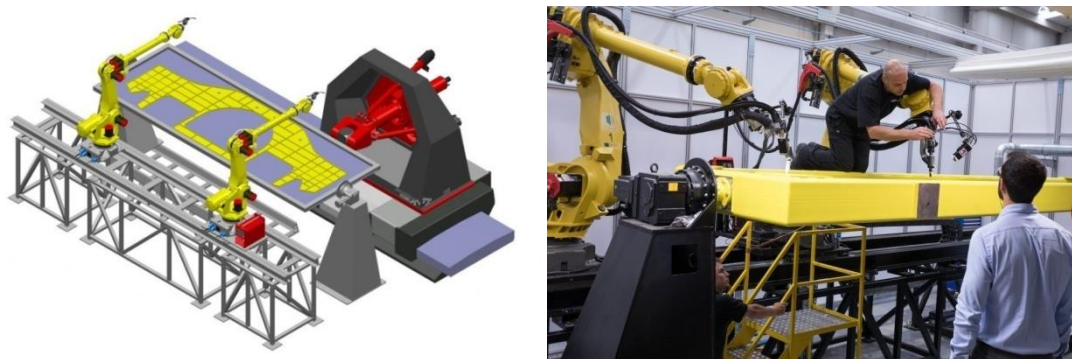


Figura 4-26: fotografía del sistema de sistema de construcción LASIMM – Fuente: [adsknews.autodesk.com](http://adsknews.autodesk.com)

Este proyecto de fabricación híbrido, está financiado por el programa de investigación y desarrollo de la Unión Europea Horizon 2020, además cuenta con la colaboración 10 organizaciones, Autodesk, Foster + Partners, Vestas Wind Systems A / S, Global Robots Ltd., Loxin2002 SL, BAE Systems, la European Weightlifting Federation, Helmholtz-Zentrum, Geesthacht Zentrum fur Material und Kustenforschung GMBH y el Instituto Superior Técnico (Portugal) y la Universidad Cranfield.



De cara al sector naval, uno de los aspectos más interesantes que presenta la impresora WAAM, es su capacidad para la reparación y el mantenimiento de componentes, hecho que puede resultar una gran ventaja en caso de averías en puerto o alta mar. La impresora ya ha sido probada en el sector naval, tal y como se muestra en el apartado 4.1 en la fabricación de la hélice WAAMPeller de RAMLAB.

- **Laser Aided Additive Manufacturing (LAAM)**



*Figura 4-27: fotografía del sistema de impresión LAAM – Fuente: [3dprintingindustry.com](http://3dprintingindustry.com)*

LAAM es un sistema de impresión aditiva para metales que muestra una buena calidad en la fabricar de piezas de complejidad media de gran envergadura. La idea de desarrollar LAAM nace en las instalaciones del centro de fabricación de aditivos metálicos en Singapur a través de la compañía local 3D Metalforge y su colaborador el Instituto de Tecnología de Manufactura de Singapur (SIMTech), este proyecto cuenta con el respaldo y cofinanciación del National Additive Manufacturing Innovation Cluster (NAMIC).

Esta impresora con una tasa de deposición de hasta 1kg/h, tiene un funcionamiento muy similar a sistema de impresión LENS, en el que un rayo láser de alta intensidad funde el polvo metálico inyectado. Además, LAAM incorpora un brazo robótico que aporta mayor flexibilidad a la impresión.

El sistema de impresión LAAM en comparación a los sistemas de impresión de lecho de polvo, presenta una zona de construcción más grande, en concreto de hasta cuatro veces más grande y diez veces más rápido.



*Figura 4-28: proceso de impresión del sistema de impresión LAAM – Fuente: [a-star.edu.sg](http://a-star.edu.sg)*

De igual manera que la impresora WAAM, LAAM también permite la reparación y mantenimiento de componentes, por lo que también sería favorable la incorporación de esta impresora en puertos o buques que realicen recorridos de larga distancia, para de una manera más económica y rápida solventar posibles imprevistos. Otro dato importante para el sector naval, es el acuerdo firmado en el centro de fabricación de aditivos metálicos de Singapur por varias empresas entre las que se encuentran

Sembcorp Marine y DNV GL, este acuerdo está enfocado entre otras cosas a la fabricación aditiva de estructuras de barcos a gran escala.

- **Titomic Kinetic Fusion**



*Figura 4-29: fotografía del sistema de impresión Titomic Kinetic Fusion – Fuente: [australiandefence.com.au](http://australiandefence.com.au)*

El sistema de impresión de Titomic basa su funcionamiento en el proceso de fabricación patentado por CSIRO del cual Titomic dispone de los derechos para su comercialización. Con una tasa de deposición de material de 45 kg/h, este proceso lo que hace es principalmente pulverizar partículas de titanio o aleación de titanio a velocidades supersónicas de aproximadamente 1km por segundo que provocan que al impactar entre ellas se fusionen mecánicamente formando una estructura sólida.



*Figura 4-30: plataforma y sistema de pulverización de Titomic Kinetic Fusion – Fuente: [titomic.com](http://titomic.com)*

Esta impresora a diferencia de los procesos tradicionales, no produce tanto desperdicio de material ni requiere de protección contra gases, además evita los riesgos de deformación por calor ya que no utiliza energía térmica en su proceso de impresión sino energía cinética.

Según afirma el CEO de Titomic, las piezas producidas presentan una resistencia muy cercana a las piezas producidas con métodos convencionales, además son más ligeras y fuertes al no estar sometidas a cortes, doblado y soldadura.

Este sistema de impresión puede ser un gran exponente para el sector naval, puesto que permitirá construir embarcaciones y diferentes componentes marinos con titanio y aleaciones de titanio, material que presenta grandes ventajas para el uso marino como son resistencia a la corrosión debida al agua salada y su alta relación resistencia /peso que permitiría un menor gasto de combustible.

#### 4.4 Ventajas y desventajas de la impresión aditiva

En este apartado, se mostrarán las ventajas y desventajas que presenta la fabricación aditiva respecto al sector naval. Gran parte de lo que se expone a continuación, está basado en las conclusiones obtenidas a través de la elaboración del trabajo. También para complementar el análisis presentado, se ha consultado artículos especializados que han facilitado la redacción.

Las principales ventajas que muestra la fabricación aditiva en el sector naval, son las siguientes:

1. **fabricación de pequeñas unidades de forma rentable:** La fabricación aditiva, a diferencia de otros procesos como pueden ser la tecnología sustractiva, no genera tanto desperdicio de material, esto se debe a que solo utiliza la cantidad necesaria requerida en el proceso de fabricación. Además, ofrece a sus usuarios la capacidad de reducir gastos de personal debido a su capacidad de automatizar los procesos. Estas características sumadas a su capacidad de fabricación rápida, le permiten ser una herramienta ideal para la producción de pequeñas unidades de forma rápida y barata.
2. **Reduce la obsolescencia:** Esta tecnología tiene la capacidad de reproducir en poco tiempo piezas averiadas de las cuales no se dispone de recambio, en algunos casos como consecuencia de una producción de serie corta que debido al encarecimiento no resulte rentable continuar con la fabricación, en otros, por el simple hecho de que dicho recambio esté obsoleto.
3. **Mayor libertad de diseño:** la fabricación aditiva, si por algo se caracteriza es por la gran facilidad que tiene a la hora de experimentar con geometrías complejas gracias a su capacidad de crear con total libertad el diseño de cualquier forma. Esto ofrece a los diseñadores la posibilidad de modelar prototipos funcionales a modo prueba y error de herramientas o productos altamente personalizados.
4. **Gran variedad de materiales:** a día de hoy se dispone de una amplia lista de materiales, cuya cantidad y variedad aumenta de manera exponencial cada año que pasa. Los fabricantes de materiales para la impresión aditiva, han sabido adaptar los diversos materiales habituales en aplicados de ingeniería para que sean compatibles con los procesos de impresión.

Las principales desventajas que muestra la fabricación aditiva en el sector naval, son las siguientes:

5. **Limitaciones dimensionales:** En la actualidad, no se dispone de muchas máquinas de impresión aditiva que puedan soportar grandes dimensiones, pese a que se espera que las nuevas generaciones de impresoras tengan esta capacidad. Por tanto, cuando se desea desarrollar algún proyecto a gran escala, este se verá limitado por el espacio, provocando que en algunos casos, sea necesario dividir el objeto a imprimir en diferentes secciones.
6. **Deformaciones de la estructura:** Si bien no todos los sistemas de impresión funcionan de la misma manera, en algunos casos los procesos de impresión también requieren de diferentes cuidados para no poner en riesgo la integridad estructural de los elementos a fabricar.

Dos claros ejemplos de esto, son los soportes de impresión y los procesos de curado del material. En el caso de los procesos de post-curado, estos suelen ser habituales en impresión de resinas. Este proceso suele ser lento y requiere de un preciso control de la temperatura para evitar posibles deformaciones. En cuanto a los soportes de impresión, para algunos sistemas de impresión, son imprescindibles para asegurar que la pieza que se está fabricando no se deforme debido a la propia forma de su estructura. Esta medida el problema que suele conllevar es el hecho de requerir de una

posterior extracción que aparte de requerir de tiempo también puede dejar marcas que requieran un posterior tratamiento de lijado, granallado o mecanizado.

- 7. Anisotropía de los materiales:** si bien los materiales metálicos se ven afectados en menor grado que los plásticos, la anisotropía afecta de manera negativa la homogeneidad de la pieza final de diferentes maneras dependiendo de la dirección de las capas. este fenómeno se podría comprender mejor si se analiza la estructura interna de los materiales. La tecnología que más se ve sometida a este tipo de comportamiento, es el sistema FDM. Esto es debido a que la tecnología de extrusión que emplea realiza una unión de pegado entre capas. Por tanto, es importante a la hora de imprimir algún elemento, tener en cuenta que según la posición de fabricación que se quiera dar, esta puede provocar una variación en las propiedades mecánicas de la pieza, llegando a alterar de forma negativa la resistencia, durabilidad o fatiga de esta.

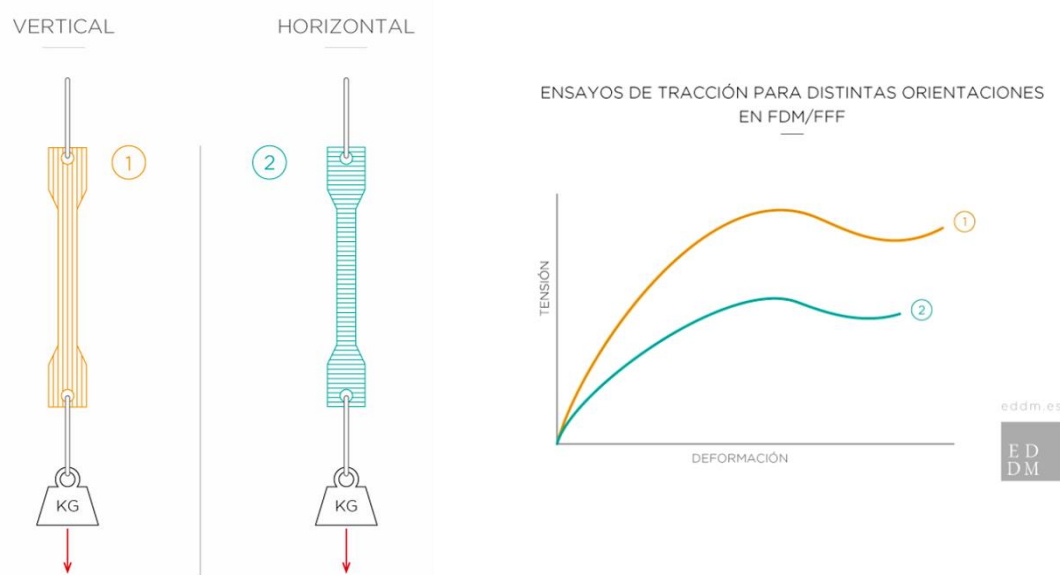


Figura 4-31: demostración de la anisotropía en la fabricación FDM – Fuente: [eddm.es](http://eddm.es)

## Capítulo 5 : Marco de calificación y certificación para la fabricación aditiva

La rápida aparición de las tecnologías de fabricación aditiva (AM) y fabricantes que ofrecen estos servicios, crea nuevas oportunidades para los usuarios finales, pero este proceso también genera una cantidad continua de cambio que podrían poner en peligro la calidad y la seguridad. Un sistema fiable de certificación podría actuar como una fuerza estabilizadora de calidad y seguridad, por tanto, establecer este sistema es la necesidad del momento. En la ilustración 5.1 que se mostrará a continuación, se presentan los diferentes puntos que se tratarán en este apartado.

### 5.1 Comparación entre los procesos de calificación y certificación

Tabla 5.1: Características típicas de los procesos de calificación y certificación – Fuente: DNVGL-CG-0197

|                               | Calificación   | Certificación  |
|-------------------------------|--|--|
| <b>Alcance</b>                | Proceso de evaluación de un prototipo de diseño/material/producto durante la fase de desarrollo/prueba para determinar si cumple con los requisitos especificados para esa fase.                                     | El proceso de evaluación de un material/producto/componente durante o al final del proceso de desarrollo/producción regular para determinar si cumple con los requisitos técnicos especificados. |
| <b>Objetivo</b>               | Para garantizar que el diseño/producto se está diseñando/construyendo de acuerdo a los requisitos establecidos.  | Para garantizar que el producto cumple con los requisitos de la norma, las necesidades del usuario y que las especificaciones son las correctas.   |
| <b>Preguntas para abordar</b> | ¿Estamos diseñando/construyendo el producto según el requisito?  | ¿Estamos construyendo el producto correcto?  |
| <b>Elementos a evaluar</b>    | Informes de viabilidad, especificaciones de requisitos, especificaciones de diseño, código de software, casos de prueba, calificación de procedimientos, parámetros de proceso, etc.                                 | El producto / software actual.   |
| <b>Actividades</b>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- opiniones</li> <li>- auditorias / visitas a sitios</li> <li>- pruebas de testigos</li> <li>- declaración de conformidad</li> <li>- aprobaciones de instalaciones</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- inspecciones</li> <li>- pruebas</li> <li>- certificación de producto</li> </ul>   |

### 5.2 Vía de certificación de DNV GL para productos de fabricación aditiva

AM es una tecnología emergente que aún no ha sido ampliamente adoptada como una ruta de proceso alternativo de fabricación para producir componentes certificados para embarcaciones o estructuras offshore de acuerdo con las reglas y normas de DNV GL en alta mar. Por lo tanto, DNV GL no aplicará el enfoque tradicional de certificación y certificación a los fabricantes y productos de AM. La aprobación de los procesos y las piezas de AM se tratará caso por caso.

La ruta de certificación para los productos de AM puede relacionarse con tres fases tal y como se ilustra en la Tabla 5.2.

Fase 1: fase de calificación del procedimiento, donde los fabricantes o usuarios finales ejecutan las calificaciones/pruebas de concepto para demostrar que tienen tecnología/productos factibles.

Fase 2: Fase de aprobación, donde se evalúan las capacidades de diseño o fabricación del fabricante o usuario final y el control de procesos para determinar si el fabricante puede producir calidades o tipos de materiales específicos que cumplan con las normas.

Fase 3: Fase de certificación, donde los fabricantes/usuarios finales requieren que DNV GL certifique el material o los productos de producción regular, ya sea como partes individuales o en lotes, según el requisito de certificación de esas partes. La participación de DNV GL en esta fase está relacionada principalmente con actividades de inspección y certificación repetitivas.

Tabla 5.2: Requisitos durante los regímenes de calificación, aprobación y certificación – Fuente: [DNVGL-CG-0197](#)

| Régimen       | Actividades  |
|---------------|--|
| Calificación  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluación de la tecnología</li> <li>- Procedimiento de fabricación</li> </ul>                                |
| Aprobación    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aprobación del fabricante</li> <li>- Homologación</li> <li>- Aprobación del proveedor de servicios</li> </ul> |
| Certificación | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Certificación de materiales</li> <li>- Certificación de producto</li> </ul>                                   |

#### • Régimen de certificación<sup>6</sup>

Los servicios de certificación de materiales y componentes (CMC) de DNV GL garantizan que los materiales utilizados y los componentes y sistemas instalados en los buques clasificados por la Sociedad cumplan con los requisitos de la norma. El valor de los servicios de CMC para los clientes de la Sociedad es que el cumplimiento de los requisitos esté verificado y documentado, y que esto se realiza de manera eficiente y rentable por personal competente.

##### - Certificación de materiales

- Aprobación del fabricante: El esquema de aprobación del fabricante<sup>7</sup> de DNV GL es un procedimiento mediante el cual la Sociedad aprueba a los fabricantes para el suministro de productos de acuerdo con las reglas y normas de la Sociedad.

<sup>6</sup>Para obtener una descripción de los requisitos, condiciones y procedimientos generales relacionados con la certificación de materiales y componentes, consultar [DNVGL-CP-0337](#).

<sup>7</sup>Para obtener una descripción de los requisitos, condiciones y procedimientos generales relacionados con el esquema de aprobación del fabricante, consultar [DNVGL-CP-0346](#).



➤ Ensayo e inspección de los materiales individuales.

#### - **Certificación de producto**

La certificación de productos basada en las reglas, en la mayoría de los casos incluirá los siguientes dos elementos principales:

1. Aprobación del diseño del producto.
2. investigación durante la producción del producto final.

Los capítulos aplicables de las normas de la Sociedad definen el alcance de la certificación requerida. La investigación se llevará a cabo en las instalaciones del fabricante. La aprobación del diseño será "caso por caso" o seguirá el procedimiento para la homologación.<sup>8</sup>

#### • **Régimen de calificación**

El proceso de calificación deberá cumplir con tres aspectos importantes relacionados con el aseguramiento de la calidad:

1. Requisitos técnicos: la parte resultante entre el proceso especificado cumple con los requisitos técnicos para dicho componente.
2. Repetitividad: es posible reproducir el mismo resultado en todo momento en diferentes lotes o pedidos.
3. Trazabilidad: es posible conocer el historial completo de cada componente desde el concepto, a través de la materia prima hasta el producto final.

El proceso de calificación para los productos de AM, se muestra en la Tabla 5.3 mediante dos etapas.

*Tabla 5.3: Etapas en el proceso de calificación – Fuente: [DNVGL-CG-0197](#)*

|   | <b>Etapla 1: Cualificación de materiales y procesos</b> | <b>Etapla 2: Calificación de componentes</b>       |
|---|---|--|
| <b>Evaluación tecnológica</b>                         | Evaluación de materiales y procesos.                    | Diseño y evaluación de requerimientos funcionales. |
| <b>Cualificación del procedimiento de fabricación</b> | Pruebas de calificación de materiales                   | Pruebas de calificación funcional.                 |

**Etapla 1:** Pruebas de integridad de materiales a través de la calificación del fabricante y del proceso. Durante esta etapa, la atención se centra en las pruebas de integridad del material, donde primero se requiere que un fabricante obtenga una "declaración de viabilidad" a través de:

- 1) Proceso de evaluación de la tecnología
- 2) establecer y calificar el procedimiento de fabricación.

<sup>8</sup>Para obtener una descripción de los requisitos generales, condiciones y procedimientos relacionados con el esquema de homologación, consultar [DNVGL-CP-0338](#).

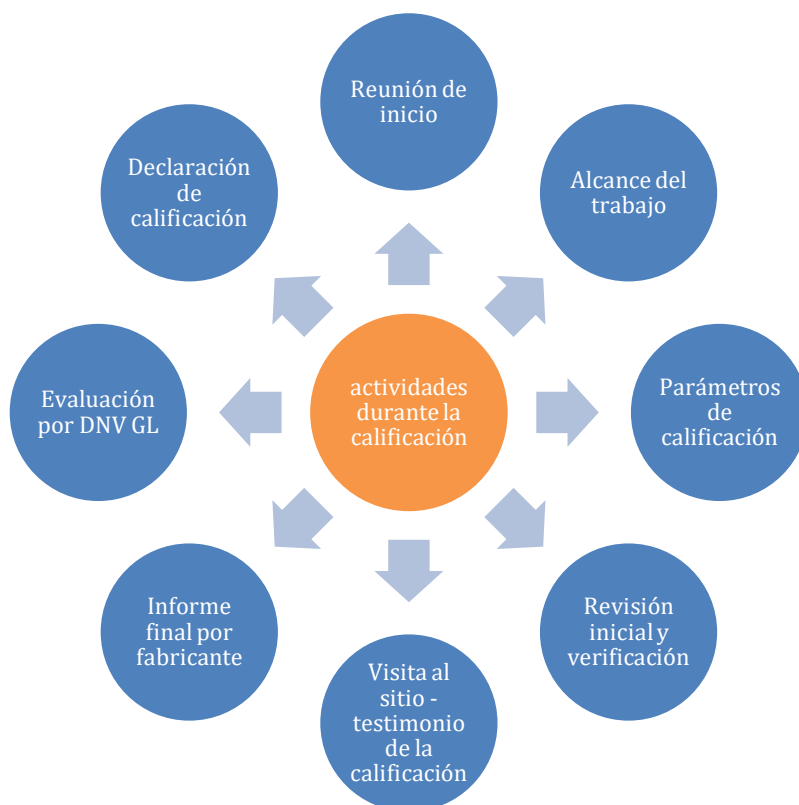
3) solicitar el estatus de fabricante aprobado bajo el esquema de aprobación del fabricante.

**Etapla 2:** Pruebas funcionales para el uso previsto o finalidad prevista. Durante esta etapa, las tecnologías de AM utilizadas o los componentes producidos por esta tecnología, se consideran totalmente calificados para su uso previsto cuando:

- 1) los modos de falla que se han identificado a través del proceso sistemático se han abordado adecuadamente.
- 2) se han proporcionado pruebas que confirman que la tecnología o el componente cumple con todos los requisitos funcionales establecidos y cumple con el objetivo de confiabilidad establecido.

- **Seguimiento de diversas actividades durante la calificación del procedimiento de fabricación**

A continuación, se presenta en la figura 5.1, un esquema que resume todos los tipos de actividades durante la calificación.



*Figura 5-1: esquema de actividades durante la calificación del procedimiento de fabricación – Fuente: propia*

➤ **Reunión de inicio**

Una reunión inicial se llevará a cabo en el momento adecuado y está destinado a:

- aclarar el alcance de la cualificación y los requisitos.
- Presentar el alcance del trabajo según lo acordado en el contrato.
- Obtener información relacionada con las instalaciones de fabricación y los laboratorios de ensayo.
- Acordar los documentos a presentar.
- acordar el calendario del proyecto



- Presentar las expectativas de DNV GL al fabricante.
- revisar la documentación relacionada con la experiencia del fabricante y/o cualquier producción de prueba.

➤ Alcance del trabajo

El ámbito de trabajo se determinará en cooperación con el cliente. Se acordará como mínimo lo siguiente:

- Grado de calificación: el número de sitios y procesos de fabricación, calidades de materiales, formas de productos, grosores de paredes, peso, etc.
- Alcance de la revisión de documentos: los documentos y procedimientos obligatorios, el número de ciclos de revisión y el plan de prueba de inspección (ITP).
- Alcance de las actividades de observación y puntos de espera: el número y la duración de las visitas al sitio. Esto dependerá de la experiencia previa del fabricante con el proceso de AM.

➤ Parámetros de calificación

El fabricante definirá los parámetros del proyecto, como el sitio de producción, ruta de producción, tipo de producto, grado de material y rango de tamaño. La elección de los parámetros debe guiarse por lo siguiente:

- Si el fabricante apunta a un proyecto específico, se recomienda utilizar los parámetros definidos por el cliente potencial.
- Si el fabricante apunta a fines comerciales generales, los parámetros deben reflejar las capacidades del fabricante y el mercado previsto para que el producto sea calificado.

Los requisitos adicionales pueden ser aplicables a través de la especificación del proyecto, pero el proceso de calificación debe cumplir plenamente con los requisitos de la norma DNV GL. Se puede hacer referencia a las especificaciones del proyecto en el informe de calificación de DNV GL si se deben considerar requisitos adicionales a los estándares mencionados anteriormente.

➤ Revisión inicial y verificación

Los documentos de calificación se prepararán antes del inicio del proceso de calificación. El resumen del fabricante y los procedimientos relacionados deben describir los pasos en la instalación de fabricación que se está calificando y deben presentar las actividades realizadas para cumplir con los requisitos establecidos.

➤ Visita al sitio - testimonio de la calificación

Todas las actividades anotadas en el plan de calificación deben ser atestiguadas durante al menos un proceso/material/componente representativo que se calificará y luego se informará en un informe de visita al sitio. La capacidad de todos los equipos utilizados en el proceso de calificación se verificará como parte de las actividades de testimonio. Todo el equipo debe ser adecuado para su propósito: debidamente identificado, mantenido regularmente y calibrado según los requisitos establecidos; Todos los certificados de calibración estarán disponibles a pedido.

La etapa final de la calificación es la prueba de materiales del componente, estas pruebas serán presenciadas por DNV GL. Las instalaciones del laboratorio deben ser evaluadas para su homologación antes de realizar las pruebas de acuerdo con los requisitos acordados. El equipo de visita de DNV GL no deberá enfrentar ninguna restricción de acceso a las instalaciones de producción durante el proceso de calificación.

➤ Informe final por fabricante

Al finalizar las pruebas de calificación, el fabricante preparará y presentará un informe detallado. El informe incluirá la información sobre la ruta y el equipo de fabricación, la documentación de todas las pruebas relevantes y los resultados de las pruebas, e incluirá los registros de pruebas originales respaldados por el inspector. El idioma de la documentación presentada será el inglés. El informe incompleto o los resultados de las pruebas que no cumplan con los requisitos dados pueden ser devueltos al fabricante para su corrección.

➤ Evaluación por DNV GL

La evaluación del cumplimiento de los requisitos se basa en el informe final, las inspecciones al sitio y informe del estudio. En caso de que la documentación o los resultados de las pruebas sean insuficientes, se informará al fabricante de las acciones futuras.

➤ Declaración de calificación

Emisión de una declaración de calificación: DNV GL emitirá una entrega apropiada según lo descrito como una declaración que confirme que las actividades de verificación y calificación del documento han concluido que el objeto cumple con los requisitos relevantes. Cualquier limitación también será descrita.

Validez de la declaración de calificación: Cualquier cambio esencial en los procedimientos y procesos/equipos requerirá una nueva calificación.

• Régimen de aprobación

A pesar de los avances recientes en el sector de fabricación de aditivos, los problemas de calidad pueden seguir siendo frecuentes y provocar accidentes fatales, paradas de equipos y la pérdida de vidas. La calidad adecuada es de gran importancia en las industrias de alto riesgo, como las embarcaciones marítimas y las instalaciones en alta mar, en las que la garantía de calidad de terceros y el control del producto desempeñan un papel esencial para garantizar la calidad de fabricación de los componentes críticos.

DNV GL se asegura de que todas las partes interesadas, es decir, los fabricantes, los constructores y los usuarios finales cuenten con reglas y estándares adecuados que aseguren de manera efectiva que los componentes se produzcan con un alto nivel de calidad según el área de aplicación. Los problemas de calidad también se han relacionado con la falta de competencia o negligencia de las partes interesadas en la cadena de suministro. Sin embargo, las acciones continuas y las reformas reglamentarias a través de la modernización de las normas y los requisitos han proporcionado herramientas adicionales para que los compradores y fabricantes puedan enfrentar estos problemas.

Como parte de este proceso, DNV GL evaluará la capacidad de los fabricantes de AM para fabricar y entregar productos de manera que cumplan requisitos establecidos por las reglas mediante el uso de

diversos métodos, como la evaluación de diseño, auditorías de planta, encuestas de fabricación, inspección y actividades de certificación, etc.

En la Tabla 5.4 se muestra resume general de los servicios de aprobación existentes de DNV GL que son relevantes para la AM.

*Tabla 5.4: Áreas típicas para la aprobación DNV GL – fuente: DNVGL-CG-0197*

| Participación en el ciclo de vida del producto AM. | Proceso relacionado  | Materiales / componentes relacionados  | Organización relacionada  |
|--|--|--|---|
| <b>Diseño</b>                                      | - Evaluación del diseño.   | - Aprobación caso por caso<br>- Aprobación de diseño   | - Aprobación como sub-proveedor   |
| <b>Feed-stock</b>                                  | - Aprobación del proceso de fabricación.<br>- Acreditación de equipos.<br>- Aprobación de consumibles.   | - Inspección / certificación de materias primas.<br>- Aprobación de fichas de datos de seguridad del material.<br>- Aprobación caso por caso | - Aprobación como fabricantes.<br>- Aprobación como sub-proveedor                                     |
| <b>Pre-procesamiento</b>                           | - Verificación de archivos de diseño y ciberseguridad.<br>- Verificación del diseño de la estructura con orientación, estructuras de soporte y muestras de prueba<br>- Integridad de software / firmware | - Revisión de modelo 3D para la fabricación.   | - Revisión de cumplimiento de la ciberseguridad.  |
| <b>Impresión 3D/ fabricación</b>                   | - Aprobación de parámetros de proceso.<br>- Acreditación de equipos de AM.<br>- Aprobación de procedimientos operativos.   | - Aprobación de la calificación del procedimiento de fabricación.  | - Certificación para operadores.<br>- Aprobación como fabricantes.<br>- Aprobación como sub-proveedor |
| <b>Pos-procesamiento</b>                           | - Aprobación de procedimientos operativos.   | - Procedimiento de extracción de muestras de ensayo.   | - Certificación para operadores.<br>- Aprobación como fabricantes.<br>- Aprobación como sub-proveedor |

## Capítulo 6 :Futuro de la fabricación aditiva en el sector naval

Si bien la industria naval a lo largo de los años se ha visto sometida a cambios importantes como por ejemplo la introducción de la fibra de vidrio, los procesos de infusión de resina al vacío o la incorporación de nuevos materiales como la fibra de carbono, realmente este sector todavía se mantiene tradicional en muchos de sus procesos de fabricación. En parte esta tradición que se ha ido heredando durante generaciones, es uno de los atractivos que más caracterizan a esta industria. Por otra parte, en la actualidad resulta ser uno de los factores que más limitan la economía del sector naval. Esto principalmente es debido a las grandes envergaduras que suelen tener las embarcaciones y a la gran cantidad de elementos que las componen, conllevando a que los proyectos desarrollados, tengan una larga duración y que requieran de una gran cantidad de procesos y personal. De ahí que durante la última recesión económica, afectara a que muchos constructores se vieran obligados a cerrar después de haber invertido grandes sumas de dinero.

Si analizamos con detenimiento el funcionamiento del sector naval como modelo de negocio, uno de los puntos que más diferencian al transporte marino respecto a otros tipos de industrias de transporte, es el hecho de no producir sus diferentes modelos en serie y en el caso de que se dé esa posibilidad suelen ser producciones cortas. En la industria naval, en muchas ocasiones no se dispone de un modelo comercial expuesto al mercado, lo que se vende suele ser el propio prototipo. Esto genera que los precios suelen ser elevados y que se desperdicie el dinero invertido en i+d, moldes y materiales.

Por tanto, estamos hablando de que a día de hoy el sector naval está regido por un mercado atomizado en el cual se encuentra un alto número de compradores y vendedores en el que las cantidades producidas o demandadas por cada uno de ellos es muy pequeña, provocando así que las empresas carezcan de poder para manipular el precio tal y como pasa en otros sectores.

La tecnología avanza a pasos agigantados y es importante adaptarse a los tiempos que corren si se desea sobresalir. Es un hecho que hoy en día el término que más renombre está ganando, es la llamada industria 4.0 o fabricación inteligente la cual consiste en incorporar las tecnologías digitales en la fabricación, con el fin de facilitar a las empresas la mejora de los procesos de fabricación de una manera considerable.

De todas estas tecnologías, la que muestra un perfil más propicio para el sector y que además presenta los medios necesarios para resolver la situación de un mercado que está en decrecimiento como es el sector naval, es la fabricación aditiva. Es evidente que esta tecnología muestra una gran compatibilidad con la fabricación de prototipos y series cortas que tanto predominan en este sector. Por tanto, es importante que las empresas empiecen a invertir capital para poder potenciar y superar los desafíos que limitan esta tecnología, como son la capacidad dimensional que a día de hoy provoca el escepticismo de algunos de los constructores a la hora de incorporar esta tecnología como alternativa de fabricación.

Si se habla de del futuro de la fabricación aditiva en el sector naval, también hay que tener muy en cuenta las nuevas tecnologías de modelado que van surgiendo y que a día de hoy son imprescindibles para obtener diseños competitivos que cumplan con los estándares de un mercado cada día más

competitivo. Un ejemplo de tecnología que facilitara esta tarea y que muestra una gran compatibilidad con la libertad de fabricación que presenta la fabricación aditiva, son los software de optimización topológica, permitiendo a los usuarios encontrar la forma más óptima que mejor se ajusta al proyecto, mediante complejas estructuras como pueden ser el tipo lattice, isogrid, panel de abeja..., para de esta manera, aligerar las estructuras, eliminar el exceso de material y en consecuencia reducir el costo de producción.

Otra tecnología complementaria que será beneficiosa para el sector naval, es el escaneo 3D, este sistema permitirá a los usuarios replicar piezas averiadas en conjunto con la fabricación aditiva y a su gran velocidad fabricación. Permitiendo obtener un modelo fabricado a bordo o en el puerto más cercano, que permita evitar tener que invertir grandes sumas de dinero en la sustitución de equipos o en el hecho de tener parada la embarcación durante un periodo de tiempo debido a la falta de recambios. Las empresas son conscientes de este hecho y por eso son cada vez más las empresas que sumadas a la iniciativa ya existente proporcionarán catálogos digitales de sus recambios en forma de archivo para combatir la obsolescencia programada con una simple descarga.

Si no se desea sustituir el elemento afectado, la impresión aditiva también facilita a reutilizar los componentes afectados. Un ejemplo de ello son los sistemas basados en soldadura, capaces de reparar o reconstruir de forma precisa y rápida la parte afectada. Esto puede ser una buena forma de ayudar a reciclar y a generar un menor gasto de recursos naturales y una menor producción de residuos.

Otro aspecto a destacar de la fabricación aditiva que permitirá reducir la carga económica que supone construir estructuras de todo tipo en el sector naval, es la capacidad que tiene este sistema de imprimir los conjuntos de piezas ya ensamblados. Con esto lo que se logrará es facilitar la faena de los operarios mediante la reducción del número de piezas involucradas en los procesos de fabricación y a su vez ahorrar en tiempo de ensamblaje. Además, al tratarse de procesos prácticamente automatizados, se reducirá el número de acciones que deben realizar los operarios, permitiendo a las empresas reducir la cantidad de personal necesario en los procesos que tanto encarece la fabricación para que prácticamente solo sean necesarios trabajos simples de supervisión y configuración.

Tampoco los materiales resultarán un problema en la adopción de la fabricación aditiva al sector naval, ya que tal y como se ha mostrado durante el trabajo, ya existen materiales similares a los empleados en el sector naval que una vez solventados algunos de los problemas que limitan la incorporación de este sistema al sector nava, permitirán obtener resultados similares a los presentados con los métodos convencionales. Además, también se podrá experimentar con materiales de otras industrias como los utilizados para la industria aeroespacial que están mostrando características muy superiores y con materiales más respetuosos con el medio ambiente que simulan a la perfección los materiales ya existentes.

## Conclusión

El trabajo surge de la curiosidad por entender más en profundidad como ha afectado la llamada industria 4.0 en el sector naval, más en concreto la fabricación aditiva, sistema de que ha día hoy tal y como se ha mostrado a lo largo del trabajo, esta revolucionado completamente la forma que tenemos de fabricar un producto determinado gracias a sus múltiples ventajas.

Después de un estudio exhaustivo, las conclusiones obtenidas tras finalizar este trabajo, son las siguientes:

En referencia a la capacidad de integración que presenta esta tecnología en el sector naval para que los principales constructores se puedan beneficiar de las ventajas que ofrece esta tecnología, se han tenido en cuenta varios factores, de los cuales los más importantes son la capacidad de fabricar productos de grandes dimensiones y los materiales a la hora de soportar estos procesos. Como resultado, se ha determinado que en la actualidad, la impresión aditiva, es capaz de soportar muchos de los procesos llevados a cabo dentro de este sector con mayor eficiencia que mediante métodos convencionales, la parte negativa es que en comparación con estos, esta tecnología todavía no está capacitada de cubrir las necesidades de los constructores a la hora de construir las estructuras de algunos de los barcos menores y todos los barcos mayores que actualmente se fabrican. Pese a ello, se espera que salgan en los próximos años, impresoras que pueden ajustarse mejor a este tipo de estructuras tal y como se ha mostrado en el trabajo.

En lo referente a los materiales, es el ejemplo más claro de la importancia que se le está dando a la fabricación aditiva en otros sectores, motivo que favorece en gran medida al sector naval, al disponer de una amplia cartelera de materiales de igual propiedad o superior a los ya utilizados en este sector.

Otro aspecto importante que se ha investigado para evaluar el nivel de integración actual, es la actividad que presenta este sistema dentro del sector naval. Para ello el trabajo se ha centrado en algunos los casos más relevantes que reflejan de forma más justa la realidad vista en el sector. Como resultado, se ha determinado que una gran parte de estos, son impulsados por jóvenes emprendedores o empresarios ya consagrados que desean invertir o crear proyectos llamativos con ideas revolucionarias que den mayor validez a la fabricación aditiva en sector naval y una pequeña minoría de empresas con experiencia en el sector que ya ha incorporado este sistema a su producción en un modelo concreto. También, dentro de la industria naval, se está potenciando esta tecnología en la armada, para construcción de embarcaciones como en el caso de Navantia, que recientemente ha cerrado un contrato para fabricar cinco fragatas de nueva generación F-110 para la armada española en las que se incorporara procesos y componentes con fabricación aditiva.

Para finalizar, se ha investigado la manera en cómo es gestionada la seguridad a la hora de fabricar productos impresos y si estos son sometidos a los mismos procesos de calificación y certificación actuales. En este caso, al tratarse de un sistema poco habitual, pero en auge, ya se ha creado su propia normativa a través de la entidad de certificación líder a nivel mundial DNV GL, la cual recientemente se ha asociado recientemente junto a otras empresas a un programa conjunto en Singapur que tiene como objetivo impulsar el uso de la fabricación aditiva en la industria naval, confirmando así la importancia que poco a poco va ganando esta tecnología en el sector naval.

Debido a todo esto expuesto, se puede concluir que la fabricación aditiva tiene cabida en el sector naval, además de un gran potencial para mejorar el futuro del sector, pero para ello las empresas encargadas de fabricar embarcaciones deben invertir tal y como se está haciendo en otros sectores para así poder desarrollar una tecnología propia que se ajuste más a las necesidades del sector naval.

Un ejemplo de ello, es la arquitectura, que para poder fabricar edificios impresos, ha diseñado sus propios sistemas de fabricación aditiva, mediante pórticos gigantes o brazos robóticos gigantes capaces de cumplir con las necesidades constructivas del sector. Con la experiencia de la que dispone el sector naval a la hora de trabajar con grandes estructuras, también debería ser suficientemente capaz de desarrollar un modelo de fabricación aditiva adecuado, que minimice los costes de operación, reduzca los tiempos de construcción y produzca menos desperdicio de material.



## Bibliografía

James K Min; Bobak Mosadegh; Simon Dunham; Subhi Jamal Al'Aref. 3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine. 1ª ed. Academic Press: Elsevier, 2018. ISBN 978-0-12-803917-5.

Khorram Niaki, Mojtaba; Nonino, Fabio. The Management of Additive Manufacturing: Enhancing Business Value. 1st ed. Springer 2017. ISBN 978-3-319-56309-1.

Wikipedia contributors. 3D printing. Wikipedia. Disponible en >[https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_printing](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing)

Estereolitografía: Proceso y materiales. 3Dilla. Disponible en ><http://es.3dilla.com/impresora-3d/estereolitografia/>

Wikipedia contributors. Stereolithography. Wikipedia. Disponible en ><https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography>

Marcelo Ruiz Camauër. ¿Cómo funcionan las impresoras 3D que utilizan luz? ¿Cómo la usan?. Quora, marzo 2018. Disponible en ><https://es.quora.com/C%C3%B3mo-funcionan-las-impresoras-3D-que-utilizan-luz-C%C3%B3mo-la-usan>

CLIP: revolucionaria tecnología de impresión 3D de alta velocidad. Imprimalia3d, marzo 2015. Disponible en ><http://imprimalia3d.com/noticias/2015/03/17/004496/clip-revolucionaria-tecnolog-impresi-n-3d-alta-velocidad>

Tecnologías 3D. 3Dnatives. Disponible en ><https://www.3dnatives.com/es/tecnologias-3d/>

Modelado por deposición fundida: Tecnología de impresión 3D. 3Dilla. Disponible en ><http://es.3dilla.com/impresora-3d/fused-deposition-modeling/>

What is 3D printing? The definitive guide. 3D Hubs, 2018 Disponible en ><https://www.3dhubs.com/what-is-3d-printing>

Technology. Xjet. Disponible en ><https://xjet3d.com/technology/>

Material de impresión 3D: Inyección de aglutinante acero inoxidable. Sculpteo. Disponible en ><https://www.sculpteo.com/es/materiales/materiales-binder-jetting/inyeccion-de-aglutinante-acero-inoxidable/>

Tecnologías de impresión 3D (V): Inyección de aglutinante. HXX, enero 2015. Disponible en ><http://hxx.es/2015/01/26/tecnologias-de-impresion-3d-v-inyeccion-de-aglutinante/>

Mksolitium. Tecnología 3D HP Multi Jet Fusion. Youtube, abril 2017. Disponible en ><https://www.youtube.com/watch?v=v5lyK8ijLjg>

Lucía C. Guía completa: Sinterizado selectivo por láser o SLS, te explicamos todo!. 3Dnatives, marzo 2019. Disponible en ><https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-selectivo-por-laser-les-explicamos-todo/>

Ryan Castells. DMLS vs SLM 3D Printing for Metal Manufacturing. Element, junio 2016. Disponible en ><https://www.element.com/nucleus/2016/06/29/dmls-vs-slm-3d-printing-for-metal-manufacturing>

Tecnologías de impresión 3D (IV): Fusión de lecho de polvo (SLM). HXX, enero 2017. Disponible en ><http://hxx.es/2015/01/17/tecnologias-de-impresion-3d-iv-fusion-de-lecho-de-polvo-slm/>

EBAM® Technology for Metal Additive Manufacturing. Sciaky. Disponible en ><http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology>

Laminated Object Manufacturing (LOM). Custompartnet. Disponible en ><http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>

Jamie D. 3D Printing in Sport: Feature Story. 3Dnatives, diciembre 2017. Disponible en ><https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-sport-201220174/>

Cristina Fernández Esteban. Un sistema de bioimpresión 3D escanea las heridas para injertar piel sana. TICbeat, marzo 2019. Disponible en ><https://www.ticbeat.com/innovacion/imprimir-piel-heridas-cronicas/>

Transportes en la impresión 3D. 3Dnatives. Disponible en ><https://www.3dnatives.com/es/category/transportes/>

Lucía C. Top 12 de los mejores proyectos que relacionan arquitectura e impresión 3D. 3Dnatives, mayo 2017. Disponible en ><https://www.3dnatives.com/es/top-arquitectura-e-impresion-3d-030520172/>

Dieter Loibner. Just Print it!, proboat, septiembre 2017. Disponible en ><https://www.proboat.com/2018/09/3d-printing-of-a-construction-mold/>

Dieter Loibner. Print Yourself a Boat. proboat, septiembre 2018. Disponible en ><https://www.proboat.com/2018/09/print-yourself-a-boat/>

Redazione. Mini 650: Livrea Yacht e OCore lo fanno con la stampa 3D. Plastix, junio 2018. Disponible en ><https://www.plastix.it/mini-650-ocore-stampa-3d/>

Beau Jackson. Lehvoss Group joins Livrea Yacht to complete world first 3D printed sailboat. 3D Printing Industry, marzo 2018. Disponible en ><https://3dprintingindustry.com/news/lehvoss-group-joins-livrea-yacht-complete-world-first-3d-printed-sailboat-130600/>

Juan Luis Arboledas. Esta es la primera hélice de barco construida por impresión 3D, hwlibre, mayo 2017. Disponible en ><https://www.hwlibre.com/esta-la-primera-helice-barco-construida-impresion-3d/>

Hanna Watkin. RAMLAB & Partners Develop World's First 3D Printed Ship Propeller. All3DP, diciembre 2017. Disponible en ><https://all3dp.com/ramlab-partners-develop-worlds-first-3d-printed-marine-propeller/>

Usando la tecnología de escaneo 3D de Artec para mantener las naves de la armada en perfectas condiciones. Artec3D, mayo 2017. Disponible en ><https://www.artec3d.com/es/news/3d-scanning-reverse-engineering-for-navy>

Redacción. El escaneo e impresión en 3D. La Real Armada holandesa. APTiE, noviembre 2017. Disponible en ><https://aptie.es/escaneo-e-impresion-3d-la-real-armada-holandesa/>

Clare Scott. 3D Printing Keeps Navy Ships Up and Running for Minimal Cost. 3Dprint, Septiembre 2018. Disponible en ><https://3dprint.com/225576/3d-printing-navy-ships/>

Anthony Lowder. SABIC Release THERMOCOMP AM Materials in Europe for Large Scale Printing. 3D printing media network, noviembre 2017. Disponible en ><https://www.3dprintingmedia.network/sabic-release-thermocomp-materials-europe-large-scale-printing/>

Stampa 3D e yacht da competizione: realizzato il componente singolo da record. teknoing. Disponible en ><https://www.teknoing.com/news/3d-printing/stampa-3d-e-yacht-da-competizione-realizzato-il-componente-singolo-da-record/>

Ya está aquí un filamento de grafeno y todo gracias a Filoalfa, impresoras3D, febrero 2018. Disponible en ><https://www.impresoras3d.com/ya-esta-aqui-un-filamento-de-grafeno-y-todo-gracias-a-filoalfa/>

Beau Jackson. UMaine receives \$500,000 to enable 3D printing of large-scale boats. 3D Printing Industry, noviembre 2018. Disponible en ><https://3dprintingindustry.com/news/umaine-receives-500000-to-enable-3d-printing-of-large-scale-boats-141810/>

Soydan Ozcan. Biomaterials for additive manufacturing. ORNL, julio 2018. Disponible en ><https://www.ornl.gov/blog/ornl-review/biomaterials-additive-manufacturing>

Michael Petch. Researchers improve 3D printed superalloys using nanomaterials. 3D Printing Industry, julio 2017. Disponible en ><https://3dprintingindustry.com/news/researchers-improve-3d-printed-superalloys-using-nanomaterials-117441/>

Lucía C. Materiales 3D: PEEK, ULTEM y otros termoplásticos avanzados. 3Dnatives, enero 2019. Disponible en ><https://www.3dnatives.com/es/materiales-3d-peek-ultem-170120192/>

Clare Scott. Manufacturing Demonstration Facility's New BAAM 3D Printer Gets a Multi-Material Upgrade. 3Dprint, junio 2017. Disponible en ><https://3dprint.com/178753/baam-multi-material-upgrade/>

BAAM. CINCINATI [Consulta: 24 novembre 2018]. Disponible en ><https://www.e-ci.com/baam>

Duane Marrett. Thermwood LSAM: Large Scale Additive Manufacturing. thermwood. Disponible en >[http://www.thermwood.com/lam\\_home.htm](http://www.thermwood.com/lam_home.htm)

Karen Mason. Moving continuous-fiber 3D printing into production. compositesworld, enero 2019. Disponible en ><https://www.compositesworld.com/blog/post/moving-continuous-fiber-3d-printing-into-production>

Wire + Arc Additive Manufacturing. waammat. Disponible en ><https://waammat.com/about/waam>

An Introduction to Wire Arc Additive Manufacturing. AMFG, mayo 2018. Disponible en ><https://amfg.ai/2018/05/17/an-introduction-to-wire-arc-additive-manufacturing/>

Ames King-Holmes. Wire arc additive manufacturing. Science Photo Library, mayo 2019. Disponible en ><https://www.sciencephoto.com/media/593361/view/wire-arc-additive-manufacturing>

The Ginkgo Press Team. 3D Metalforge and SIMTech to Develop Large Format LAAM Technology in Singapore. G3D PRESS, junio 2017. Disponible en ><https://press.ginkgo3d.com/3d-metalforge-and-simtech-to-develop-large-format-laam-technology-in-singapore/>

Agency for Science, Technology and Research (A\*STAR). Nanoparticles improve the strength of metallic alloys. phys.org, junio 2017. Disponible en ><https://phys.org/news/2017-06-nanoparticles-strength-metallic-alloys.html>

Hannah Rose Mendoza. Singapore's Offshore and Marine Sector Boosts Global Edge with 3D Printing. 3D Printing, noviembre 2017. Disponible en ><https://3dprint.com/193961/singapore-offshore-and-marine/>

Darren Quick. World's largest metal 3D-printer scales up additive manufacturing. new atlas, mayo 2018. Disponible en ><https://newatlas.com/titomic-worlds-largest-metal-3d-printer/54667/>

DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING: ANISOTROPÍA. Ingenius Blog by EDDM, marzo 2019. Disponible en ><https://eddm.es/blog-ingenius/design-for-additive-manufacturing-anisotropia-en-impresion-3d/>

Jeff Moser. 3D Printing in Boatbuilding. power & motoryacht, enero 2018. Disponible en ><https://www.powerandmotoryacht.com/boats/3d-printing-in-boatbuilding>

Terry Wohlers. Rapid Prototyping: Tooling & Manufacturing State of the Industry. wohlers associates, 2005 Disponible en ><http://www.wohlersassociates.com/history.pdf>

Lonnie J. Love; Brian Post; Alex Roschli. Wide and High Additive Manufacturing(WHAM). OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, marzo 2017. Disponible en >[https://web.ornl.gov/sci/manufacturing/docs/reports/web\\_Ingersoll%20Machine%20Tools\\_MDF-TC-2016-89\\_%20Final%20Report.pdf](https://web.ornl.gov/sci/manufacturing/docs/reports/web_Ingersoll%20Machine%20Tools_MDF-TC-2016-89_%20Final%20Report.pdf)

Nikola Knezović; Angela Topić. Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM): A New Advance in Manufacturing. ResearchGate, junio 2018 Nikola Knezović; Angela Topić. Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM): A New Advance in Manufacturing. ResearchGate, junio 2018. Disponible en >[https://www.researchgate.net/publication/325092297\\_Wire\\_and\\_Arc\\_Additive\\_Manufacturing\\_WAAM\\_-\\_A\\_New\\_Advance\\_in\\_Manufacturing](https://www.researchgate.net/publication/325092297_Wire_and_Arc_Additive_Manufacturing_WAAM_-_A_New_Advance_in_Manufacturing)

Additive manufacturing: ualification and certification process for materials and components. DNV GL, noviembre 2017. Disponible en ><https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/CG/2017-11/DNVGL-CG-0197.pdf>

José-Esteban Pérez García. LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN NAVAL, LA UNIÓN EUROPEA Y EL SIGLO XXI. EL SECTOR MARÍTIMO EN LA ECONOMÍA Y EL COMERCIO, Marzo-Abril 2018. n.º 901, p. 115-128. Disponible en ><http://www.revistasice.com/index.php/ICE/article/view/2006/2006>

